

Université de Sherbrooke

Faculté de génie

Département de génie électrique et de génie informatique

*CONCEPTION DE MATRICES DE DIODES AVALANCHE À PHOTON
UNIQUE SUR CIRCUITS INTÉGRÉS CMOS 3D*

Thèse de doctorat

Spécialité : génie électrique

Benoit-Louis BÉRUBÉ

Jury : Jean-François PRATTE

Réjean FONTAINE

Serge CHARLEBOIS

Gabriella CARINI

Paul CHARETTE

Roger LECOMTE

Sherbrooke (Québec), Canada

Février 2014

À mes parents,

RÉSUMÉ

La photodétection est un sujet de recherche très actif encore de nos jours et l'industrie, particulièrement de la physique des hautes énergies et de l'imagerie médicale, est en quête de détecteurs avec une plus grande sensibilité, de meilleures résolutions temporelles et une plus grande densité d'intégration.

Pour ces raisons, les photodiodes avalanche à photon unique (*Single photon avalanche diode*, ou SPAD) suscitent beaucoup d'intérêt depuis quelques années pour ses performances en temps et sa grande photosensibilité. Les SPAD sont des photodiodes avalanche opérées au-dessus de la tension de claquage et un photoporteur atteignant la région de multiplication peut à lui seul déclencher une avalanche soutenue de porteurs et entraîner le claquage de la jonction. Un circuit détecte le courant divergent et l'étouffe en abaissant la polarisation de la jonction sous la tension de claquage. Le circuit recharge ensuite la jonction en réappliquant la tension initiale permettant la détection d'un nouveau photon.

Dans le but d'augmenter le nombre de photons simultanés détectables, les SPAD s'intègrent en matrice. Cependant, dans le cas où une matrice de SPAD et leurs circuits d'étouffement s'intègrent sur le même substrat, la surface photosensible devient limitée par l'espace qu'occupent les circuits d'étouffement. Dans le but d'augmenter leur région photosensible, les matrices de SPAD peuvent s'intégrer en trois dimensions (3D) avec leurs circuits d'étouffement.

Ce projet porte sur le développement de matrices de SPAD en technologie CMOS HV 0,8 μm de *Teledyne DALSA* dédiées à une intégration 3D avec leurs circuits d'étouffement actifs. Les résultats de caractérisation montrent que les SPAD atteignent une résolution temporelle de 27 ps largeur à mi-hauteur (LMH), possèdent un taux de comptage en obscurité (DCR, ou *Dark Count Rate*) de $3 \text{ s}^{-1}\mu\text{m}^{-2}$ et ont une probabilité de photodétection (PDP) de 49 %. De plus, une méthode d'isolation utilisant un puits p a été développée. Les SPAD conçus avec cette méthode ont un facteur de remplissage pouvant atteindre 54 % et une probabilité de diaphonie de 6,6 % à une tension excédentaire à la tension de claquage (V_E) de 4 V.

Mots clés : photodiodes, photodiodes avalanche, photodiodes avalanche à photon unique, probabilité de photodétection, taux de comptage en obscurité, afterpulsing, diaphonie et résolution temporelle.

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord toute l'équipe du GRAMS avec qui j'ai travaillé tout au long du projet, c'est vraiment une équipe formidable. Plus particulièrement, j'aimerais remercier Marc-André, Étienne, Alexandre et Andrey avec qui j'ai eu de nombreuses discussions scientifiques très enrichissantes mais aussi avec qui j'ai eu beaucoup de plaisir à travailler. Je veux remercier également Jonathan et Luc de m'avoir donné un fier coup de main pour la conception du circuit imprimé et la caractérisation. Merci à Samuel, pour toutes les discussions qu'on a eu durant les derniers droits de mon projet, pour tout le temps que tu as mis sur la caractérisation et pour avoir porté si fièrement les lunettes de protection laser. Ça été un plaisir de travailler avec toi. Je dois aussi une partie du succès de ce projet à Vincent avec qui j'ai passé un nombre *incalculable* d'heures à la conception du ASIC et à la caractérisation. Ça été un réel plaisir de faire équipe avec toi. Merci à toute l'équipe du GRAMS !

Je remercie sincèrement Réjean, Serge et Jean-François d'avoir cru en moi tout au long du projet. J'ai appris énormément à travailler à vos côtés et je l'apprécie beaucoup.

Je tiens aussi à remercier Paul Charrette et son étudiant de l'époque Charles Richard de nous avoir offert l'opportunité de joindre des SPAD sur votre puce. Ça été la pierre angulaire du projet. Merci également de m'avoir fait confiance et m'avoir gracieusement prêté le matériel nécessaire à la caractérisation des SPAD.

Je dois remercier aussi Yves Bérubé-Lauzière de nous avoir prêté tout son matériel et de nous avoir donné de son temps.

Je remercie également Frédéric Laforce et Pierre Deschamps d'*Excelitas Technologies* de nous avoir accueillis trois jours dans leurs laboratoires. Ça été une expérience vraiment enrichissante.

Finalement, je remercie aussi Stéphane Martel pour ta confiance et avoir partagé autant d'informations avec nous. Cette collaboration a été essentielle à la réussite du projet.

Finalement, je remercie ma famille de m'avoir supporté tout au long de ce projet et d'avoir toujours cru en moi. Je veux remercier aussi celle avec qui je partage ma vie, *Johannie*, qui a su m'appuyer sans condition tout au long du projet.

À tous, je vous remercie chaleureusement.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE 1. INTRODUCTION	25
1.1 Historique des photodétecteurs	26
1.1.1 Tubes photomultiplicateurs	26
1.1.2 Photodiode PIN	27
1.1.3 Photodiodes à effet avalanche	28
1.1.4 Diode avalanche à photon unique	28
1.2 Intégration 3D de circuits intégrés.....	30
1.2.1 Via d'interconnexion.....	32
1.3 Problématique	32
1.3.1 Intégration de matrices de SPAD en 3D.....	33
1.3.2 Question de recherche.....	35
1.4 Objectifs	35
1.4.1 SPAD en CMOS.....	36
CHAPITRE 2. THÉORIE DES PHOTODÉTECTEURS	39
2.1 Caractéristiques des photodiodes	39
2.1.1 Courant d'obscurité	40
2.1.2 Bruit	41
2.1.3 Rendement quantique	42
2.1.4 Le temps de réponse.....	45
2.2 Photodiode PIN.....	45
2.3 Photodiode à avalanche.....	45
2.4 Diode avalanche à photon unique	46
2.4.1 Principe de fonctionnement	46
2.4.2 Probabilité de photodétection.....	48
2.4.3 Résolution temporelle	51
2.4.4 Taux de comptage en obscurité.....	52
2.4.5 Afterpulsing.....	53
2.4.6 Diaphonie.....	54

2.4.7	Microfabrication de SPAD.....	58
2.4.8	Circuits d'étouffement.....	62
2.4.9	Matrices de SPAD	64
2.4.10	Comparaison d'un SPAD et d'une photodiode linéaire.....	67
2.4.11	SPAD développés en technologie CMOS.....	68
2.4.12	SPAD en procédé dédié à l'optoélectronique	70
2.4.13	Conclusion	71
CHAPITRE 3. CONCEPTION.....		73
3.1	Simulations par éléments finis.....	73
3.1.1	Méthodologie de simulation	73
3.1.2	Structure de SPAD à puits profonds	74
3.1.3	Structure de SPAD à puits peu profonds	76
3.1.4	Simulation de l'isolation à puits <i>p</i>	78
3.2	Premier prototype	79
3.2.1	Structure des SPAD.....	80
3.2.2	Montage de caractérisation	81
3.3	Deuxième prototype	83
3.3.1	Structure des SPAD.....	85
3.3.2	Matrices de SPAD destinées à l'intégration 3D (Puce A).....	88
3.3.3	SPAD avec circuits d'étouffement actifs (Puce B).....	91
3.3.4	Matrices 3 × 3 (Puce D).....	96
3.3.5	SPAD sans électronique (Puce E)	97
3.3.6	Puce F – Structures de test pour TSV.....	99
3.3.7	Montage de caractérisation	102
CHAPITRE 4. CARACTÉRISATION		105
4.1	Tension de claquage.....	105
4.1.1	Premier prototype	106
4.1.2	Deuxième prototype.....	107
4.2	Résistance de jonction.....	108
4.3	Capacité parasite	111
4.3.1	Mesures CV	111

4.3.2	Modèle des capacités de jonction	112
4.3.3	Résultats.....	113
4.4	Mesure du DCR	113
4.4.1	Méthode de caractérisation.....	113
4.4.2	Effet de la tension d'opération	114
4.4.3	Effet de la température	116
4.4.4	Impact du design.....	118
4.4.5	Impact de la tension de claquage	120
4.5	Afterpulsing.....	123
4.5.1	Méthode de l'histogramme	123
4.5.2	Méthode de l'autocorrélation	125
4.5.3	Comparaison entre les SPAD conçus	125
4.5.4	Effet de la température et du temps mort	126
4.5.5	Indépendance du DCR.....	128
4.5.6	Effet du taux de comptage.....	129
4.6	Mesure de la diaphonie	130
4.6.1	Méthode des évènements simultanés.....	131
4.6.2	Méthode du faisceau focalisé	132
4.6.3	Méthode de l'histogramme	132
4.6.4	Corrélation croisée.....	133
4.6.5	Résumé des méthodes de caractérisation.....	134
4.6.6	Diaphonie sur une matrice 3 × 3	134
4.6.7	Comparaison du type d'isolations de SPAD	135
4.6.8	Comparaison des méthodes de mesures.....	141
4.7	Mesure de probabilité de photodétection	142
4.7.1	Méthode par faisceau focalisé.....	143
4.7.2	Méthode utilisant une sphère intégratrice.....	145
4.7.3	Résultats du premier prototype.....	147
4.7.4	Résultats du deuxième prototype.....	147
4.8	Mesures de résolution temporelle	150
4.8.1	Méthode de caractérisation.....	151
4.8.2	Résultat du deuxième prototype	153

CHAPITRE 5. DISCUSSION.....	157
5.1 Simulations vs caractérisation	157
5.1.1 Tension de claquage	157
5.1.2 Isolation à puits p	157
5.1.3 Comportement des anneaux de garde	158
5.1.4 Performances en temps	158
5.2 Diaphonie	159
5.2.1 Isolation à puits p	159
5.2.2 Intégration sans isolation	159
5.2.3 Isolation à puits n	160
5.2.4 Résumé.....	160
5.3 Point d'opération optimal d'une matrice	161
5.4 Autres recommandations	162
5.4.1 Structure de SPAD recommandée	162
5.4.2 Étude du DCR.....	164
5.4.3 Étude de la diaphonie.....	164
5.4.4 SPAD à anneau de polysilicium.....	164
CHAPITRE 6. CONCLUSION.....	167
LISTE DES RÉFÉRENCES.....	169
ANNEXE A. PROTOTYPE 1	177
ANNEXE B. PROTOTYPE 2 – PUCE A.....	179
ANNEXE C. PROTOTYPE 2 – PUCE B.....	181
ANNEXE D. PROTOTYPE 2 - PUCE D	183
ANNEXE E. PROTOTYPE 2 - PUCE E.....	185
ANNEXE F. PROTOTYPE 2 - PUCE F.....	187

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Schéma du fonctionnement de base d'un tube photomultiplicateur (image tirée de [25]).....	27
Figure 1.2 Comparaison de (a) intégration 2D, (b) système sur puce (<i>System on Chip</i> , ou SOC) et (c) intégration 3D (image tirée de [59]).....	31
Figure 1.3 Intégration 3D de SPAD (couche 1) avec les circuits d'étouffement (couche 2) et l'électronique de lecture (couche 3).	34
Figure 2.1 Pièges dans la bande interdite créant (a) de la recombinaison, (b) de la génération, (c) un piège à électron et (d) un piège à trou.	40
Figure 2.2 Schéma de bande à (a) faible champ, (b) fort champ montrant la génération bande à bande et (c) fort champ montrant la génération bande à bande assistée d'un piège.	41
Figure 2.3 Coefficient d'absorption dans le spectre du visible pour différents matériaux (image tirée de [75]).....	44
Figure 2.4 Nombre relatif de photons absorbés en fonction de la longueur d'onde pour différentes épaisseurs de la couche p^+ (d_i) et de l'épaisseur de la zone de déplétion (W_e) pour une diode p+n verticale (image tirée de [72]).....	44
Figure 2.5 (a) Représentation de l'ionisation par impact créant une avalanche soutenue de porteurs et (b) représentation de la courbe I/V d'une photodiode opérée en régime linéaire et en régime <i>Geiger</i>	48
Figure 2.6 Exemple d'une courbe de PDP en fonction de la longueur d'onde pour (a) deux SPAD fabriqués en technologie CMOS 0,35 μm et 0,8 μm montrant une allure non uniforme (image tirée de [80]) et (b) un SPAD à illumination par l'arrière en technologie dédié à l'optoélectronique utilisant une couche antiréfléchissante (image tirée de [79]).....	49
Figure 2.7 Les trois régions utilisées pour le modèle du calcul de la PDP utilisé.....	50

Figure 2.8 Exemple du résultat d'une mesure en temps d'un SPAD montrant le nombre de comptes en fonction du temps (image tirée de [52]).	52
Figure 2.9 Matrice de 3×3 SPAD (S1 à S9) montrant de la diaphonie directe et en diagonale ainsi que de la diaphonie de premier et deuxième ordre.	55
Figure 2.10 Interactions possibles de la diaphonie directe et en diagonale de premiers ordres des cellules (a) 00, (b) 01 et (c) 11 ainsi que les interactions possibles de diaphonie de deuxième ordre des cellules (d) 00, (e) 01 et (f) 11.	57
Figure 2.11 Taux de comptage normalisé T_{11}/DCR en fonction de la probabilité de diaphonie directe P_c et d' <i>afterpulsing</i> P_a .	58
Figure 2.12 (a) Diffusion des porteurs d'une jonction crée une courbure de la jonction cylindrique de rayon r_j . (b) Vue en trois dimensions montrant la jonction sphérique. (c) Tension de claquage normalisée de la jonction sphérique et cylindrique en fonction du rayon normalisé. (images tirées de [75]).	60
Figure 2.13 (a) SPAD en CMOS 0,35 μm avec anneau de garde par diffusion utilisant un <i>p-tub</i> (image tirée de [87]), (b) SPAD en CMOS 0,18 μm avec anneau de garde par des <i>Shallow Trench Isolation</i> (STI) (image tirée de [88]), et (c) SPAD en CMOS 0,35 μm avec anneau de garde virtuel (image tirée de [87]).	61
Figure 2.14 (a) Circuit d'étouffement passif. (b) Circuit équivalent du SPAD.	63
Figure 2.15 Exemple de SiPM où les SPAD sont étouffés individuellement avec une résistance R_L et le signal de sortie consiste en la somme analogique des signaux provenant des SPAD.	66
Figure 2.16 Exemple d'une matrice de SPAD étouffé activement où la somme analogique des courants de sorties des circuits d'étouffement génère le signal de sortie.	66
Figure 2.17 (a) Taux de comptage en obscurité (DCR) normalisé et (b) résolution temporelle de SPAD en différentes technologies CMOS.	70
Figure 3.1(a) Vue en coupe d'un SPAD à anneau de garde par diffusion avec les résultats de simulation et (b) profil du champ électrique de la région de multiplication et de l'anneau de garde simulé.	75

Figure 3.2 Vue en coupe d'un SPAD à anneau de garde par diffusion avec le résultat d'une simulation montrant une variation du potentiel électrostatique sous le puits p signifiant un appauvrissement complet du puits n	76
Figure 3.3 (a) Vue en coupe d'un SPAD à anneau de garde virtuel avec les résultats d'une simulation et (b) profil du champ électrique de la région de multiplication et de l'anneau de garde simulé.	77
Figure 3.4 Vue en coupe d'un SPAD sans anneau de garde montrant un champ électrique élevé en périphérie du SPAD confirmant un claquage latéral indésirable.	78
Figure 3.5 Vue en coupe de deux SPAD à anneau de garde à diffusion avec une isolation à puits p montrant une variation du potentiel électrostatique sous le puits p signifiant un appauvrissement complet du puits n et une isolation électrique des SPAD.	79
Figure 3.6 Illustrations du premier prototype montrant (a) une photographie et (b) le schéma de masque et la numérotation des puces et des plots d'interconnexion.	80
Figure 3.7 Vue en coupe de la structure conçue dans le premier prototype.	81
Figure 3.8(a) Schéma de masque du circuit imprimé et (b) schémas montrant l'interconnexion de deux SPAD avec le circuit d'étouffement intégré au circuit imprimé.	82
Figure 3.9 Signal de sortie typique du premier prototype présentant un long temps de recharge.	83
Figure 3.10 Illustration du deuxième prototype montrant (a) une photographie de la puce et (b) les schémas de masque avec la numérotation des puces.	84
Figure 3.11 (a) Structure à anneau de garde par diffusion implanté dans un puits n profond et (b) structure à anneau de garde virtuel utilisant un niveau n - <i>tub</i> implanté dans un puits n peu profond.	85
Figure 3.12 Schémas de masque d'un SPAD montrant (a) une distribution symétrique des contacts à l'anode et la cathode et (b) une distribution asymétrique des contacts à la cathode.	87

Figure 3.13 Isolation des SPAD utilisant (a) puits n , (b) puits p et (c) aucune isolation.	88
Figure 3.14 (a) Schéma de masques de la puce A du deuxième prototype contenant 6 matrices (M1 à M6) de 22×22 SPAD, où l'anode de chacun des 2904 SPAD est interconnectée à un site de TSV et (b) figure montrant les 5 différentes structures de SPAD ainsi que les sites de TSV.	90
Figure 3.15 (a) Schéma de masques de la puce B du deuxième prototype contenant 15 matrices (M1 à M15), totalisant 88 SPAD avec circuits d'étouffement avec la numérotation et mettant en évidence les trois nœuds de haute tension avec (b) le schéma bloc de l'électronique de lecture (image tirée de [97]).	92
Figure 3.16 Signal de sortie d'un SPAD de la matrice 4 sur la puce B du deuxième prototype avec à 50 ns de temps mort.	93
Figure 3.17 (a) la matrice M3 de 2×3 SPAD divisée en 3 paires de SPAD pour une étude de diaphonie et (b) la matrice M4 de 2×3 SPAD montrant différentes géométries.	94
Figure 3.18 (a) Schéma de masque de la puce D du deuxième prototype contenant deux matrices de 3×3 SPAD avec circuits d'étouffement avec la numérotation des plots et (b) la numérotation des SPAD S1 à S9 pour chacune des matrices.	96
Figure 3.19 Signal de sortie d'un SPAD de la matrice 0 sur la puce D du deuxième prototype avec 25 ns de temps mort.	97
Figure 3.20 Schéma de masques de la puce E contenant des SPAD sans électronique et numérotation des plots et des SPAD.	98
Figure 3.21 Vue en coupe d'un SPAD avec un anneau de polysilicium en périphérie du SPAD montrant le cas où un potentiel négatif (V_-) est appliqué permettant l'inversion de population.	99
Figure 3.22 Schéma de masques de la puce F1 intégrant des structures de Kelvin, des chaînes de TSV ainsi que des structures de mesures CV.	100
Figure 3.23 Vue en coupe d'une chaîne de TSV à quatre terminaux.	101

Figure 3.24 (a) Vue du dessus du dessin de masques d'une structure de Kelvin utilisée pour caractériser la résistance d'un TSV ainsi que (b), la vue en coupe.	101
Figure 3.25 Puce F2 contenant des structures de mesures CV radiofréquences (RF).	102
Figure 3.26 Schémas de masque de (a) la carte-mère et (b) la carte-fille, ainsi que les photographies de (c) la carte-mère et (d) la carte-fille.	103
Figure 4.1 Tension de claquage en fonction de la température pour le SPAD S du premier prototype à anneau de garde par diffusion et les SPAD à anneau de garde virtuel et par diffusion du deuxième prototype.	108
Figure 4.2 Courant de la cathode en fonction de la tension à la cathode polarisant le SPAD en inverse pour (a) le SPAD D du groupe 2 de la puce E du deuxième prototype à anneau de garde à diffusion de 0,8 μm de large et (b) SPAD A du groupe 2 de la puce E du deuxième prototype à anneau de garde virtuel de 1 μm de large.	110
Figure 4.3 Modèle des capacités parasites du SPAD avec les capacités parasites d'interconnexion des plots.	112
Figure 4.4 DCR en fonction de la tension excédentaire pour le SPAD S du premier prototype à 27°C, une superficie de 7 800 μm^2 et DCR de 1 000 000 à $V_E=0,7\text{V}$	115
Figure 4.5 DCR en fonction de la tension excédentaire pour le SPAD à anneau de garde par diffusion avec (SPAD 1, matrice 0 de la puce B) et sans gravure du diélectrique (SPAD 2, matrice 6 de la puce B) et pour le SPAD à anneau de garde virtuel (SPAD 1, matrice 7 de la puce B) à 25°C pour le deuxième prototype.	116
Figure 4.6 DCR en fonction de la tension excédentaire pour le SPAD S du premier prototype à $V_E = 0,3\text{V}$, SPAD à anneau de garde par diffusion (SPAD 1, matrice 6 de la puce B) et SPAD avec anneau de garde virtuel (SPAD 1, matrice 7 de la puce B) du deuxième prototype opéré à $V_E = 2\text{V}$	117
Figure 4.7 DCR en fonction de l'espacement anode-cathode de SPAD à anneau de garde à diffusion de la matrice 1 de la puce B du deuxième prototype à $V_E = 3\text{V}$, temps mort de 50 ns et 25°C.	119

Figure 4.8 DCR en fonction de l'espacement anode-cathode des 6 SPAD à anneau de garde à diffusion de la matrice 3 de la puce B du deuxième prototype montrant également la valeur moyenne du DCR pour différents voltages excédentaires et temps mort de 50 ns et 25°C.....	120
Figure 4.9 DCR en fonction de la tension de claquage pour les SPAD à anneau de garde par diffusion avec une isolation à puits n provenant de M1, M4 et M6 de la puce B à $V_E = 2$ V et $T_M = 50$ ns présenté en fonction de (a) l'espacement anode-cathode et (b) la largeur minimale de la région photosensible.	122
Figure 4.10 Histogramme des comptes en fonction du délai montrant l'effet d' <i>afterpulsing</i> à moins de 1 μ s de délais avec une échelle (a) linéaire sur l'axe des x pour montrer la distribution exponentielle et (b) logarithmique sur l'axe des x pour mettre l'accent sur le lissage.....	124
Figure 4.11 Probabilité d' <i>afterpulsing</i> en fonction de la tension excédentaire pour 4 SPAD du deuxième prototype; SPAD à anneau de garde à diffusion avec une surface photosensible de 1182 (SPAD 0, matrice 9 de la puce B), 200 (SPAD 2, matrice 1 de la puce B) et 130 μ m ² (SPAD 1, matrice 6 de la puce B) ainsi qu'un SPAD à anneau de garde virtuel de 121 μ m ² (SPAD 1, matrice 7 de la puce B) de surface photosensible.....	126
Figure 4.12 Probabilité d' <i>afterpulsing</i> du deuxième prototype de la matrice 1 de la puce D en fonction du temps mort à 10, 20 et 30°C à $V_E = 1$ V.	127
Figure 4.13 Probabilité d' <i>afterpulsing</i> du SPAD 1 de la matrice 6 de la puce B du deuxième prototype en fonction de la température à $V_E = 4$ V et un temps mort de 25 ns.....	128
Figure 4.14 (a) DCR normalisé en fonction de la tension excédentaire pour deux SPAD à anneau de garde par diffusion de la matrice 6 ainsi que (b) Probabilité d' <i>afterpulsing</i> en fonction de la tension excédentaire à $T = 25^\circ\text{C}$ et $T_M = 25$ ns.	129
Figure 4.15 (a) DCR normalisé en fonction de la tension excédentaire d'un SPAD à anneau de garde à diffusion ainsi que (b) probabilité d' <i>afterpulsing</i> en fonction de la tension excédentaire à $T = 25^\circ\text{C}$ et $T_M = 100$ ns pour le même SPAD de la matrice 6 de la puce B du deuxième prototype en noirceur et éclairé par un faisceau focalisé.....	130
Figure 4.16 Schéma de masque de la matrice 0 de la puce D du deuxième prototype montrant la diaphonie directe et en diagonale.....	135

- Figure 4.17 (a) Probabilité de diaphonie totale pour une paire de SPAD direct et une paire de SPAD en diagonale intégrée dans une matrice 3×3 sur la puce D du prototype 2 et utilisant une isolation de puits p avec un espace mort de $8 \mu\text{m}$ et $\text{TM} = 50 \text{ ns}$ à 25°C mesurées avec la méthode de l'histogramme ainsi que (b) histogramme et lissage sur $10 \mu\text{s}$ correspondant à la distribution dans le temps des délais entre les évènements de chaque paire de SPAD.....137
- Figure 4.18 Probabilité de diaphonie directe mesurée par la méthode de l'histogramme pour les 3 paires de SPAD de $207 \mu\text{m}^2$ (matrice 3 de la puce B) sans isolation avec $5,5$, $9,5$ et $17,5 \mu\text{m}$ d'espace mort et $\text{TM} = 25 \text{ ns}$ à 25°C138
- Figure 4.19 Histogramme des délais entre les évènements de (a) une paire de SPAD sans isolation ($5,5 \mu\text{m}$ d'espace mort et $200 \mu\text{m}^2$ d'aire) et une paire de SPAD avec isolation à puits p ($8 \mu\text{m}$ d'espace mort et $1800 \mu\text{m}^2$ d'aire) montrant le lissage et le moment de la recharge à $V_E = 4 \text{ V}$ et $\text{TM} = 50 \text{ ns}$ et 25°C et (b) une paire de SPAD avec une isolation à puits n dans les mêmes conditions.139
- Figure 4.20 Modélisation de l'angle de photoémission par radiation Bremsstrahlung pour (a) une paire de SPAD sans isolation ($5,5 \mu\text{m}$ d'espace mort et $200 \mu\text{m}^2$ d'aire) et (b) une paire de SPAD avec isolation à puits p ($8 \mu\text{m}$ d'espace mort et $1800 \mu\text{m}^2$ d'aire).....141
- Figure 4.21 Comparaison de la probabilité de diaphonie directe pour une paire de SPAD sans isolation avec $9,5 \mu\text{m}$ d'espace mort et $\text{TM} = 25 \text{ ns}$ à 25°C (matrice 3 de la puce B) mesurée avec la méthode des évènements simultanés, de lissage et du faisceau focalisé.142
- Figure 4.22 Photographie du montage permettant la mesure de la probabilité de photodétection (PDP) par la méthode du faisceau focalisé.145
- Figure 4.23 Schéma d'un montage permettant la mesure de la probabilité de photodétection (PDP) avec une sphère intégratrice.146
- Figure 4.24 Taux de comptage normalisé du SPAD S du premier prototype à $V_E = 1 \text{ V}$ en fonction du courant injecté dans une LED bleue éclairant le SPAD.....147
- Figure 4.25 PDP à 440 nm en fonction de la tension excédentaire pour un SPAD à anneau de garde à diffusion de $200 \mu\text{m}^2$ de région active avec (SPAD 2, matrice 0 de la puce B) et sans

gravure du diélectrique (SPAD 1, matrice 6 de la puce B) ainsi qu'un SPAD à anneau de garde virtuel (SPAD 0, matrice 7 de la puce B) de $130 \mu\text{m}^2$ avec $T_M = 100 \text{ ns}$ à 25°C	148
Figure 4.26 Photographie (a) d'un SPAD sans gravure du diélectrique. Photographie d'un SPAD avec gravure du diélectrique avec (b) le focus sur le dessus et (c) le focus au fond montrant la surface du SPAD détériorée.....	149
Figure 4.27 PDP en fonction de la longueur d'onde pour un SPAD à anneau de garde à diffusion typique (SPAD 1, matrice 6 de la puce B) et un SPAD à anneau de garde virtuel (SPAD 1, matrice 7 de la puce B) à $V_E = 4 \text{ V}$ et $T_M = 100 \text{ ns}$ à 25°C	149
Figure 4.28 Photographie et schéma du montage permettant la mesure de résolution temporelle et utilisant un laser pulsé Ti :Sapphire.....	152
Figure 4.29 Histogramme des délais d'arrivée d'évènements montrant la résolution temporelle d'un SPAD à anneau de garde à diffusion $58 \mu\text{m}^2$ (SPAD 3, matrice 4 de la puce B) à $V_E = 3 \text{ V}$ et $T_M = 50 \text{ ns}$ à 25°C mesurés avec un pulse laser de 4 ps LMH à 400 nm	153
Figure 4.30 Résolution temporelle mesurée en fonction de la tension excédentaire pour deux SPAD à anneau de garde à diffusion de superficie différente et un SPAD à anneau de garde virtuel avec $T_M = 50 \text{ ns}$ à 25°C	154
Figure 4.31 Résolution temporelle en fonction de l'aire de SPAD de à anneau de garde à diffusion à $V_E = 3 \text{ V}$ et $T_M = 50 \text{ ns}$ à 25°C	155
Figure 5.1 Vue en coupe d'une structure de SPAD recommandé utilisant une implantation <i>p-ajuste</i> dans la région de multiplication pour réduire le dopage <i>n</i> effectif, réduire le champ électrique et augmenter la tension de claquage du dispositif.	162
Figure 5.2 Simulations avec Taurus Medici du champ électrique en fonction de la profondeur dans la région de multiplication d'une structure typique à anneau de garde par diffusion avec et sans implantation d'ajustement de la tension de claquage P_{ajust}	163
Figure 5.3 Vue en coupe d'un SPAD avec un anneau de polysilicium en périphérie du SPAD montrant le cas où un potentiel négatif (V_-) par rapport à la polarisation du puits <i>n</i> est appliqué permettant l'inversion de population à la surface.	165

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Résumé des performances de photodétecteurs commerciaux.	68
Tableau 2.2 Résumé de l'effet des paramètres physiques sur les performances des SPAD où les effets annotés de (+) ont un impact positif sur les performances, les effets annotés de (-) ont un impact négatif sur les performances et les paramètres marqués d'un X ont aucun effet sur la performance indiquée.	72
Tableau 4.1 Résistance de jonction du premier et deuxième prototype.....	111
Tableau 4.2 Capacité de jonction du SPAD S du premier prototype.	113
Tableau 4.3 Coefficient exponentiel de la température du lissage de courbes de la figure 4.6.	118
Tableau 4.4 Tableau résumant les méthodes de caractérisation de la diaphonie et leurs capacités à mesurer et distinguer la diaphonie électrique à la recharge de la diaphonie optique.	134

LISTE DES ACRONYMES

APS : *Active Pixel Sensor*, pour capteurs à pixels actifs

ASIC : *Application Specific Integrated Circuit*, pour circuits intégrés dédiés

BGA : *Ball grid array*, pour boîtier à billes matricées

CCD : *Charge-Coupled Device*, pour dispositif à couplage de charge

CI3D : Circuit intégré en trois dimensions

CMOS : *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*

CRN² : Centre de recherche en nanofabrication et nanocaractérisation

DCR : *Dark count rate*, pour taux de comptage en obscurité

CMP : *Chemical-mechanical polishing*, pour polissage mécanique-chimique

CVD : Chemical vapor deposition, pour dépôt chimique en phase vapeur

DRIE : *Deep reactive ion etch*, pour gravure ionique réactive profonde

EBIC : *Electron beam induced current*, pour courant induit par faisceau d'électrons

FLIM : *Fluorescence lifetime imaging microscopy*, pour microscopie par temps de vie de la fluorescence

FPN : Fixed Pattern Noise, pour bruit fixe de non-uniformité

GAPD : *Geiger Mode Avalanche Photodiode*, pour diode avalanche opérée en mode Geiger

GRAMS : Groupe de recherche en appareillage médical de Sherbrooke

IRM : Imagerie par résonance magnétique

ITRS : *International Technology Roadmap for Semiconductors*

LMH : Largeur à la mi-hauteur, en anglais appelé *Full Width at Half Maximum* (FWHM)

L1/100H : Largeur à 1 centième de la hauteur maximale

MEMS : *Micro-electro-mechanical systems*, pour microsystèmes électro-mécanique

MPPC : *Multi-Pixel Photon Counter*, pour photomultiplicateur sur silicium

MCP : Module de comptage de photon, ou *Single Photon Counting Module*

PDA : Photodiode à effet avalanche

PDP : Probabilité de photodétection, en anglais appelé *Photodetection efficiency* (PDE)

PECVD : *Plasma-enhanced chemical vapor deposition*, pour dépôt chimique en phase vapeur assistée par plasma

PID : Boucle d'asservissement proportionnel intégral dérivé

PMT : *Photomultiplier Tubes*, pour tubes photomultiplicateurs

SiPM : *Silicon Photomultiplier*, pour photomultiplicateur sur silicium

SoC : *System on a Chip*, pour système sur puce

SPAD : Single Photon Avalanche Diode, pour diode avalanche à photon unique

SRH : Shockley-Read-Hall

STI : *Shallow trench isolation*, pour tranchée étroite d'isolation

TDM : Tomodensitométrie

TEP : Tomographie d'émission par positrons

TSV : *Through silicon via*, pour via au travers du silicium

LISTE DES SYMBOLES

EAC : Espacement anode - cathode des SPAD

ENS : Espacement puits n - substrat

F_R : Facteur de remplissage

T_M : Temps mort du circuit d'étouffement après un évènement sur un SPAD

V_E : Voltage excédentaire à la tension de claquage servant à polariser les SPAD

LEXIQUE

Anneau de garde par diffusion : Méthode pour éviter le claquage latéral d'un SPAD ou d'une PDA utilisant une diffusion en périphérie de la jonction pn .

Anneau de garde virtuel : Méthode pour éviter le claquage latéral d'un SPAD ou d'une PDA utilisant une diffusion dans la région photosensible du SPAD afin de réduire le champ électrique en périphérie et éviter un claquage latéral.

Lidar : Capteur actif qui mesure le temps de propagation d'un faisceau lumineux.

Capacité : Propriété que possède un condensateur d'accumuler une charge électrique.

Effet tunnel : Fait référence à la génération bande à bande de porteurs ou l'effet Zener.

Espace mort : Distance SPAD à SPAD de la région p^+ .

Facteur de remplissage : Ratio de la surface photosensible sur la surface totale d'une matrice de détecteur.

Région de multiplication : Région d'une photodiode à avalanche ou un SPAD où l'on retrouve de l'ionisation par impact.

Plage d'opération : Dans le cadre de ce document, elle se définit comme la plage en termes de photons par seconde détectable par un photodétecteur. En d'autres termes, c'est le flux de photons minimum et maximum mesurable par un photodétecteur permettant un signal de sortie proportionnel au signal d'entrée en termes de photons/secondes.

CHAPITRE 1. INTRODUCTION

Les photodétecteurs sont de nos jours un sujet de recherche très actif et l'industrie est en quête de détecteurs avec une plus grande sensibilité et de meilleure résolution temporelle [1]. De plus, l'intégration des systèmes prend une place de plus en plus importante sur le marché comme le stipule la loi de « More than Moore » [2]. Cette dernière est définie par l'ITRS (*International Technology Roadmap for Semiconductors*) comme étant l'ajout de fonctionnalités aux systèmes que la loi de Moore traditionnelle ainsi que le « More Moore » ne prévoient pas [3]. Ces fonctionnalités sont de façon générale celles qui ne sont pas numériques, comme la communication radio fréquence (RF), le contrôle de puissance, les composants passifs, les actuateurs et les détecteurs [3].

Une panoplie d'applications nécessitent une grande densité de photodétecteurs tout en ayant de bonnes performances tel que les lidars [4], l'exploration spatiale [5], les caméras à image en trois dimensions (3D) [6], la physique des hautes énergies, la tomographie d'émission par positrons (TEP) [7], la tomodensitométrie (TDM), les imageurs TEP/TDM [8, 9] et TEP/Imagerie par résonance magnétique (IRM) [10-13], la tomographie optique diffuse, la microscopie par temps de vie de la fluorescence (on l'appelle en anglais *fluorescence lifetime imaging microscopy*, ou FLIM) [14], et bien d'autres.

Les photodétecteurs occupent ainsi une place importante dans la recherche universitaire. À titre d'exemple, la TEP, une modalité d'imagerie médicale utilisant le rayonnement gamma, est de plus en plus utilisée, mais présente en contrepartie un réel danger puisque les doses absorbées par les patients peuvent être significatives [15]. Il est donc important de développer des systèmes de détection, et l'électronique qui y est associée, avec une meilleure sensibilité permettant l'augmentation du contraste des images produites et la réduction des doses de radiation utilisées et ainsi la réduction des risques liés à leur utilisation. La diminution des dimensions des détecteurs permet également d'augmenter la résolution spatiale des systèmes de détection et d'améliorer la qualité des images obtenues. Aussi, une bonne résolution temporelle permet l'amélioration de la qualité des images obtenues. Finalement, d'autres contraintes peuvent s'ajouter aux systèmes hybrides, tels que la TEP/IRM qui nécessite des détecteurs insensibles à de forts champs magnétiques.

Ce chapitre explore l'histoire des photodétecteurs et principalement les détecteurs sur silicium. Ensuite, les défis de l'intégration de circuits intégrés en trois dimensions (3D) sont décrits. Finalement, la problématique de l'intégration 3D de SPAD est présentée ainsi que les objectifs du projet.

1.1 Historique des photodétecteurs

La recherche sur les photodétecteurs est très active depuis le début du siècle dernier où les tubes photomultiplicateurs (PMT) ont été mis au point [1]. Il y a eu par la suite plusieurs détecteurs sur matériau semi-conducteur tels que les diodes *pin* [17], les photodiodes à avalanche (PDA) [18], les CCD (*charge-coupled device*) [19] et les imageurs CMOS [20].

Cette section décrit les PMT, les photodiodes PIN, les PDA ainsi que les photodiodes à photon unique.

1.1.1 Tubes photomultiplicateurs

La détection de signaux lumineux à très faible intensité est possible depuis l'invention du tube photomultiplicateur (*Photomultiplier tubes* ou PMT) en 1913 par Elster and Geiter quelques années après la formulation de l'effet photoélectrique par Einstein [17]. Pour une raison de coûts et de défis mécaniques, il a fallu plus de 20 ans avant que les PMT ne soient commercialisés par les laboratoires RCA en 1936 [17].

Le fonctionnement simplifié d'un PMT est représenté à la figure 1.1. Ces derniers sont constitués d'un tube sous-vide où les photons sont d'abord absorbés par la photocathode, constituée d'un matériau permettant la photoémission d'électron. Les photoélectrons sont ensuite attirés par une première dynode polarisée par un fort potentiel électrique relativement à la photocathode, pouvant aller jusqu'à 400 V et permettant la multiplication de porteurs. Les porteurs sont ensuite attirés vers une seconde dynode, polarisée jusqu'à 150 V au-dessus de la première dynode [21]. Un PMT peut ainsi être constitué de plusieurs dynodes, permettant d'obtenir un gain jusqu'à 10×10^6 et une très bonne résolution temporelle, pouvant aller jusqu'à 200 ps LMH. Des versions exotiques de PMT permettent même d'atteindre des résolutions temporelles inférieures à 50 ps LMH. Ces caractéristiques les rendent

attractants pour plusieurs applications comme la détection par bioluminescence [22] et par fluorescence [23], la TEP [22], le comptage de photons corrélés en temps¹ [24], etc.

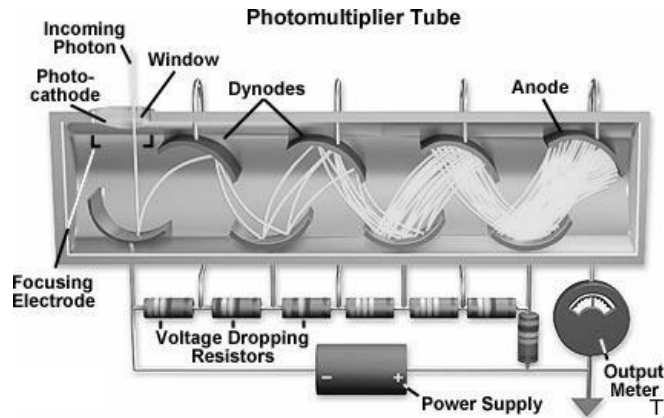


Figure 1.1 Schéma du fonctionnement de base d'un tube photomultiplicateur (image tirée de [25]).

Cependant, les PMT sont coûteux et leurs dimensions importantes les rendent inappropriés pour les applications où une grande densité de détecteurs est nécessaire. De plus, les PMT sont sensibles au champ magnétique et ne sont donc pas un candidat idéal pour les applications de détection de particules chargées en physique des hautes énergies où de forts champs magnétiques sont requis [1]. Finalement, les PMT requièrent une alimentation pouvant atteindre les milliers de volts, augmentant la complexité des systèmes de détection les utilisant.

1.1.2 Photodiode PIN

Dans les années suivant la commercialisation des PMT, la recherche a permis le développement des photodiodes PIN. Compactes et insensibles aux champs magnétiques, ces diodes sont devenues ainsi les premiers détecteurs sur silicium utilisés à grande échelle [1, 26]. Les photodiodes *PIN* sont utilisées depuis les années 60 principalement dans le domaine de la physique des hautes énergies et en imagerie médicale. Elles sont simples et nécessitent un système de lecture peu coûteux. Les diodes PIN sont utilisées entre autres pour la détection de particules chargées en physique des hautes énergies [27], pour la tomographie mammaire par rayons X [28], la radiographie par rayons γ [29] et en exploration spatiale [5]. Pour ces applications, les photodiodes sont utilisées pour la mesure en énergie des signaux.

¹ En anglais, cette application est appelée *Time-Correlated Single Photon Counting* (TCSPC)

On retrouve également dans la littérature des photodiodes conçues pour faire du calcul de temps de vol pour des applications de caméras 3D [5, 30].

1.1.3 Photodiodes à effet avalanche

Durant les mêmes années que les diodes PIN sont développées, les photodiodes à effet avalanche (PDA) sont également développées et se composent de jonctions *pn* conçues pour être opérées en régime d'ionisation par impact ou effet avalanche. Le champ électrique de leur jonction est suffisant pour qu'un photoporteur acquière l'énergie cinétique nécessaire pour ioniser d'autres porteurs. De cette façon, le signal de sortie des PDA possède alors un gain, mais contrairement aux PIN, les PDA sont plus bruyantes et plus difficiles à opérer puisqu'elles sont très sensibles aux variations de température et de polarisation. De nos jours, elles sont couramment utilisées dans une multitude d'applications. Notamment la détection de rayons X [31], la fluorescence par rayons X rétrodiffusés [32], le calcul de temps de vol pour la mesure de distance [33, 34], la FLIM [35], la TEP [7] ainsi que la tomographie combinée TEP/TDM [8, 9] et TEP/IRM [10-13].

1.1.4 Diode avalanche à photon unique

En 1961, c'est-à-dire durant les mêmes années où les diodes PIN et PDA ont été développées, on découvre qu'il est possible d'opérer une PDA en mode non linéaire en la polarisant au-dessus de sa tension de claquage. Ce mode d'opération permet le comptage de photons et une résolution d'un seul photon [36].

Contrairement à une PDA en mode linéaire où le photocourant est proportionnel au flux de photons incident, ce mode fonctionne comme un compteur; pendant un certain laps de temps, aucun courant ne circule dans la diode jusqu'au moment où un porteur photogénéré ou généré thermiquement déclenche une avalanche incontrôlée de porteurs qui sature la jonction. Pour fonctionner correctement, un circuit externe détecte l'avalanche, l'étouffe en abaissant la tension et réamorce la diode en vue d'une nouvelle détection.

C'est en 1964 que Haitz associe le fonctionnement de ce type de diode à un compteur Geiger [37]. C'est ainsi qu'est apparue un nouveau type de photodétecteur appelé « diode avalanche opérée en mode Geiger » (*Geiger mode avalanche photodiode, ou GAPD*) ou diode avalanche à photon unique (*Single Photon Avalanche Photodiode, ou SPAD*). Le fonctionnement de ce type de diodes a suscité beaucoup

de recherche et a pris près de deux décennies avant d'être mieux compris [37-41]. Au début des années 80, les SPAD sont décrits comme des dispositifs ayant un potentiel de détection avec une résolution temporelle de quelques dizaines de picosecondes semblable aux PMT exotiques mais avec une plus grande densité d'intégration [42]. À partir de la fin des années 80, une augmentation considérable de recherches sur les SPAD voit le jour [43-49], spécialement pour la spectroscopie par temps de vie de la fluorescence (*fluorescence lifetime spectroscopy*) [14]. C'est durant les années 2000 que ces systèmes de détection sont proposés dans le domaine biomédical à titre d'alternative aux PMT [50, 51].

Les SPAD permettent une grande densité d'intégration, ont une grande photosensibilité et ont une excellente résolution temporelle. Cependant, ces dispositifs sont très sensibles aux défauts dans la structure cristalline du substrat utilisé et peuvent être très bruyants, spécialement à haute température. Ils se caractérisent en termes de probabilité de photodétection (PDP), de résolution temporelle et de taux de comptage en obscurité (DCR, ou *Dark Count Rate*).

Intégration en matrices

Un SPAD possède un taux de comptage maximum correspondant à la période engendrée par le temps pris pour étouffer l'avalanche une fois la jonction en claquage et recharger la jonction. Ainsi, le SPAD à lui seul peut détecter un flux de photon maximal qui constitue la borne supérieure de la plage d'opération du SPAD. Pour les jonctions *pn* opérées en mode linéaire, cette limite est fixée par le circuit de lecture. Cette borne supérieure couplée au plus faible flux de photons détectables constitue la plage d'opération des photodétecteurs.

Afin d'augmenter leur plage d'opération, les SPAD peuvent s'intégrer en matrice [52-54]. Ainsi, pour une surface donnée, une matrice de SPAD a un taux de comptage maximum bien plus élevé qu'un SPAD seul. Une des techniques pour fabriquer un tel détecteur est d'étouffer individuellement les SPAD avec un circuit passif et de connecter leurs sorties en parallèle. On appelle ces dispositifs des photomultiplicateurs sur silicium (en anglais *Silicon photomultiplier*, ou SiPM) dont leur sortie est un signal analogique dépendant du nombre de SPAD déclenchés [55]. Les SiPM possèdent une résolution temporelle de l'ordre de quelques centaines de picosecondes. Les applications visées sont la physique des hautes énergies, la spectroscopie par fluorescence et la TEP [55].

Les SPAD peuvent également être intégrés en matrice et être étouffés avec des circuits actifs. Le signal de sortie d'un tel dispositif est numérique et permet d'améliorer la photosensibilité et la résolution

temporelle comparées aux SiPM. Par contre, ces dispositifs sont très complexes puisqu'ils nécessitent beaucoup d'électronique. Les applications visées pour ce type de matrices de SPAD sont les caméras 3D [56] et la TEP [57].

1.2 Intégration 3D de circuits intégrés

Selon plusieurs auteurs, l'intégration de circuits intégrés en trois dimensions (CI3D) permettra de continuer à doubler le nombre de transistors des puces à chaque deux ans, comme le stipule la loi de Moore [58, 59]. De plus, les CI3D permettent l'intégration hétérogène de différentes technologies et l'ajout de fonctionnalités aux systèmes existants, comme le prévoit la loi de « More than Moore ».

L'intégration 2D de circuits est l'association de plusieurs circuits intégrés assemblés sur un substrat (*interposer*), comme il est montré à la figure 1.2 (a). Cette intégration nécessite de longues interconnexions utilisées pour la communication entre les différents circuits intégrés dédiés (en anglais appelé *application specific integrated circuit* ou ASIC). Ces longues interconnexions possèdent une impédance relativement élevée et augmentent la consommation des circuits, le couplage du bruit et la latence des signaux [59]. La figure 1.2 (b) présente les systèmes sur puce (en anglais *System on Chip* ou SoC), c'est-à-dire un système comprenant plusieurs circuits de différents types et intégrés sur un même substrat². Puisque les interconnexions entre les circuits sont moins longues que l'intégration 2D, elles ont donc une impédance plus faible et offrent donc une meilleure bande passante. La conception et la fabrication des SoC présentent cependant des difficultés et le temps de mise en marché est important [59]. De plus, l'utilisation des SoC n'est pas viable pour les technologies CMOS sous les 32 nm puisque leurs coûts à ces dimensions deviennent trop élevés due à la grande densité d'interconnexions [58].

² Par exemple, plusieurs types de SoC sur le marché intègrent un CPU (*Central Processing Unit*) et GPU (*Graphics Processing Unit*) et sont destinés aux téléphones intelligents et aux tablettes

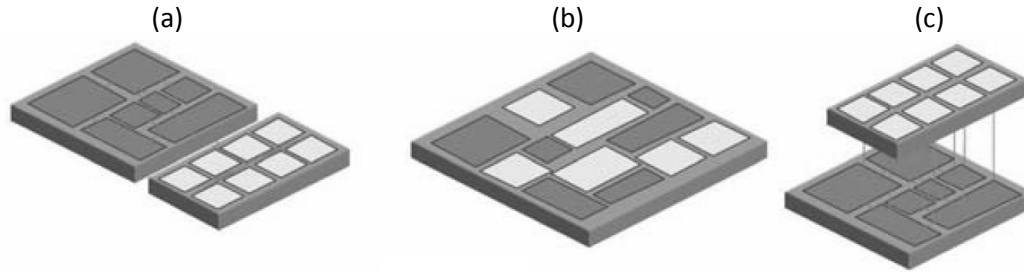


Figure 1.2 Comparaison de (a) intégration 2D, (b) système sur puce (*System on Chip*, ou SOC) et (c) intégration 3D (image tirée de [59]).

L'intégration 3D, représentée à la figure 1.2(c), est un paradigme d'intégration utilisant des interconnexions verticales entre les circuits permettant la réduction de leurs impédances caractéristiques et la réduction de la consommation des systèmes ainsi que l'augmentation de la bande passante.

Les circuits intégrés en trois dimensions (CI3D) offrent plusieurs avantages clés poussant l'industrie de la microélectronique à leurs développements. Premièrement, la faible impédance des interconnexions des CI3D a une incidence sur les performances électriques des systèmes. Typiquement, un TSV de $5\text{ }\mu\text{m}$ de diamètre, $50\text{ }\mu\text{m}$ d'épaisseur de diélectrique et une longueur de $50\text{ }\mu\text{m}$ possède une résistance de $\sim 50\text{ m}\Omega$, une inductance de $\sim 35\text{ pH}$ et une capacité de $\sim 50\text{ fF}$. Ils permettent de réduire la consommation électrique par rapport aux systèmes 2D conventionnels, la diaphonie entre les interconnexions et les délais des signaux [60, 61]. De plus, l'intégration 3D hétérogène permet d'opter pour des technologies optimales pour différentes parties d'un système intégré. Par exemple, une technologie CMOS 3,3V éprouvée pour concevoir un circuit analogique pourrait s'intégrer en 3D avec une technologie CMOS haute densité pour des fonctionnalités numériques avancées.

On retrouve dans la littérature plusieurs imageurs intégrés en 3D avec leurs circuits de lectures permettant l'augmentation de la bande passante et la réduction de la consommation énergétique [61, 62]. Les CI3D permettent la conception de systèmes monolithiques³ et hétérogènes offrant beaucoup de flexibilité. Une intégration 3D hétérogène permet l'utilisation de technologies optimisées pour chacune des fonctions désirées. Dans le cas des SPAD, ces derniers pourraient être fabriqués par un procédé dédié à l'optoélectronique et la couche de circuits d'étouffement par une technologie CMOS submicronique pour plus de fonctionnalités.

³ Des CI3D monolithiques on compte les mémoires non volatiles de type FLASH

1.2.1 Via d'interconnexion

Pour concevoir les interconnexions des différentes couches des CI3D, on utilise généralement des TSV (*Through silicon via*) [59]. Ces derniers sont des trous traversant le substrat de silicium fait par gravure profonde par ions réactifs (en anglais appelé *Deep reactive Ion Etching* ou DRIE) ou par laser. Les TSV gravés par DRIE atteignent un ratio largeur/hauteur avoisinant 10 [59]. Les substrats sont amincis par meulage et polis par un procédé mécanique chimique (en anglais appelé *chemical mechanical polishing*, ou CMP) [63-66].

Les parois intérieures des trous sont recouvertes d'un isolant et/ou d'une barrière selon les matériaux utilisés pour la métallisation. Ces couches peuvent être déposées par dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (en anglais *Plasma enhanced chemical vapor deposition*, ou PECVD) ou simplement crue en fournaise [64]. La métallisation des TSV se fait généralement par du cuivre déposé par électroplaquage [66] ou par du polysilicium [64].

Il existe une grande variété de procédés de fabrication de TSV pour développer des CI3D. Les TSV peuvent se fabriquer avant les premiers composants actifs ou après. Ces procédés s'appellent respectivement *via-first* ou *via-last* [64]. On peut également faire les TSV avant ou après l'amincissement de la tranche. De plus, il est possible de faire de l'intégration 3D, puce-à-puce (*die-to-die*), puce-à-tranche (*die-to-wafer*) ou tranche-à-tranche (*wafer-to-wafer*). Lorsque les via sont remplis de polysilicium, on peut fabriquer des TSV typiquement jusqu'à 5 μm de diamètre [64]. Mais généralement, les TSV possèdent une profondeur de 10 à 50 μm et un diamètre de 5 à 50 μm et sont remplis de cuivre ou de tungstène.

1.3 Problématique

Les PMT présentent de meilleures performances en termes de résolution temporelle que les PDA et les diodes PIN. Cependant, ils présentent une densité d'intégration moins élevée, des coûts plus importants, une plus grande sensibilité aux champs magnétiques et des tensions d'opération élevées.

D'un autre côté, la résolution temporelle des SPAD est meilleure que les PMT. Les SPAD sont également insensibles aux champs magnétiques, potentiellement peu coûteux et peuvent s'intégrer densément. Également, leur tension d'opération raisonnable de vingt à quelques centaines de volts facilite la

conception de systèmes comparativement aux PMT. De plus, leur intégration en circuit monolithique CMOS facilite la production de masse.

La résolution d'un SPAD peut atteindre moins de 20 ps LMH [67]. Les matrices de SPAD conçues avec des circuits d'étouffement sur un même substrat améliorent la résolution temporelle comparativement aux SiPM [52-54]. La compagnie *Phillips* commercialise un détecteur de ce type et l'appelle dSiPM pour *digital* SiPM. La mesure de puissance du flux de photons incident sur leur dSiPM se fait en sommant de façon numérique le taux de comptage de chacun des SPAD [52-54]. Dans cette architecture, les circuits de lecture se situent près des SPAD et l'impédance des interconnexions est donc faible réduisant la charge de l'avalanche et la consommation du dispositif, l'*afterpulsing* [68] et le temps d'étouffement de l'avalanche [69].

La solution de *Phillips* présente cependant deux problèmes. Premièrement, puisque les SPAD partagent la surface disponible avec leurs circuits d'étouffement et l'électronique de lecture, la surface photosensible du détecteur n'est pas optimale, réduisant la PDP. Deuxièmement, étant donnée la nature monolithique du système, les SPAD doivent être conçues par le même procédé de fabrication que l'électronique de lecture. Ainsi, un compromis doit être fait entre une technologie optimale pour la conception des SPAD et les fonctionnalités des circuits de microélectronique. En effet, un procédé CMOS de faibles dimensions comme les technologies CMOS 0,13 et CMOS 0,18 μm sont optimales pour l'électronique de lecture, mais ne le sont pas nécessairement pour la fabrication de SPAD puisque les jonctions sont peu profondes, leurs tensions de claquage plus faibles et ils présentent généralement un taux de comptage en obscurité (DCR) élevé. En contrepartie, un procédé CMOS dédié à l'optoélectronique, par exemple le procédé AMS CMOS 0,35 μm [70], est mieux adapté pour la fabrication de SPAD. Les jonctions sont à cet effet conçues pour avoir une tension de claquage élevée permettant de réduire le DCR et augmenter la PDP. Par contre, l'intégration d'une électronique de lecture à très haute densité est plus difficile.

1.3.1 Intégration de matrices de SPAD en 3D

L'intégration 3D hétérogène de matrices de SPAD avec l'électronique de lecture telle qu'elle est montrée à la figure 1.3, permet l'utilisation d'une technologie de fabrication optimale pour les SPAD en optimisant le facteur de remplissage des matrices et une seconde technologie optimale pour l'électronique de lecture. L'intégration 3D permet dans un premier temps la réduction des capacités

parasites puisque les interconnexions sont très courtes (10 à 50 μm [60]). Dans un second temps, les CI3D permettent l'augmentation de la surface photosensible puisque les circuits d'étouffement et de contrôle ne se trouvent pas sur le même substrat que les photodétecteurs. De plus, cette méthode permet d'accroître la flexibilité des systèmes puisqu'elle permet d'intégrer des photodétecteurs sur des substrats autres que le silicium. De plus, l'électronique de lecture peut être modifiée pour différentes applications en utilisant la même matrice de SPAD.

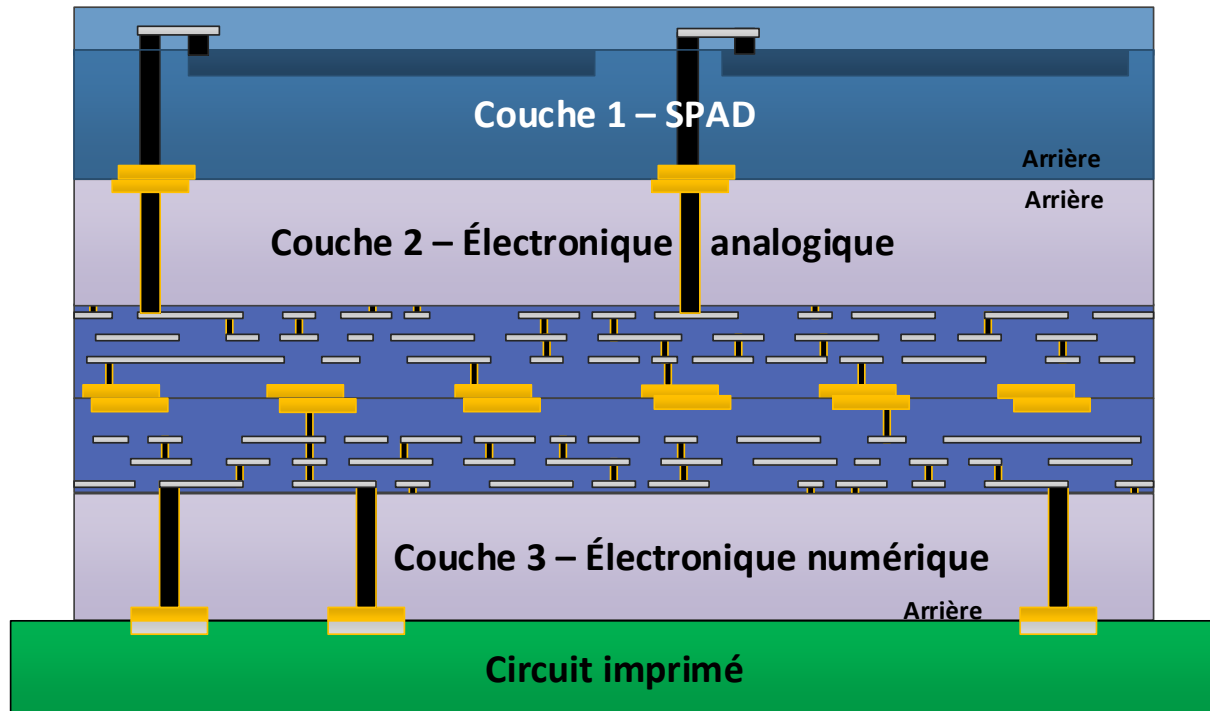


Figure 1.3 Intégration 3D de SPAD (couche 1) avec les circuits d'étouffement (couche 2) et l'électronique de lecture (couche 3).

1.3.2 Question de recherche

Ceci nous amène à nous poser la question suivante :

« Est-il possible de réaliser des matrices de SPAD en technologies CMOS HV Teledyne DALSA destinées à une intégration 3D (avec leurs circuits de lecture et de traitement de l'information) avec des performances comparable à l'état de l'art? »

1.4 Objectifs

Ce projet de doctorat porte sur le développement de matrices de SPAD en technologie CMOS 0,8 μm haut-voltage (HV) pour des applications requérant de très bonnes résolutions temporelles et une excellente PDP telle que les caméras 3D, la TEP et la TEP/IRM. Contrairement à ce qui est retrouvé dans la littérature, les matrices de SPAD de ce projet sont destinées à une intégration hétérogène ou monolithique⁴ en trois dimensions avec l'électronique de lecture afin de réduire la consommation électrique des dispositifs, maximiser la surface photosensible, maximiser la PDP et intégrer des circuits de microélectronique pour ajouter des fonctionnalités avancées. L'intégration hétérogène permet l'utilisation d'une technologie de microfabrication optimale pour les photodétecteurs et une technologie optimale pour l'électronique de lecture. Ainsi, la réalisation de ce projet a pour but d'augmenter significativement les performances de matrices de SPAD en termes de PDP et de résolution temporelle.

L'objectif principal de ce projet de doctorat est :

« Mettre en œuvre une matrice de SPAD conçue en technologie CMOS 0,8 μm HV et dédié à une intégration 3D hétérogène (avec un circuit d'étouffement actif en CMOS 0,13 μm , CMOS 0,8 μm et CMOS 65 nm) à l'aide de via métalliques traversant complètement le substrat de silicium appelés TSV (Through silicon via), »

Les TSV ainsi que le collage des puces seront réalisés dans les salles blanches du *Centre de recherche en nanofabrication et nanocaractérisation* (CRN²) de l'Université de Sherbrooke.

⁴ Une intégration 3D hétérogène fait référence à un assemblage 3D de puces provenant de technologies distinctes. Une intégration 3D monolithique fait référence à un assemblage 3D de puces provenant d'une même technologie.

Le projet a également trois objectifs secondaires. Le premier concerne le développement de SPAD et se décrit par :

« Développement de SPAD en CMOS HV de Teledyne Dalsa avec des performances semblables à des structures retrouvées dans la littérature, c'est-à-dire une PDP entre 20 et 40 % à 420 nm, un DCR inférieur à $10 \text{ s}^{-1}\mu\text{m}^{-2}$, une probabilité d'afterpulsing <5 % et une résolution temporelle <50 ps largeur à mi-hauteur (LMH). »

Ensuite, le second objectif porte sur le développement de matrice de SPAD et se décrit comme :

« Développement d'une technologie d'isolation de SPAD permettant l'intégration de SPAD en matrice avec un facteur de remplissage d'au moins 50 % tout en limitant la probabilité de diaphonie à <10 % »

Le dernier sous-objectif concerne le développement de structure de test et la caractérisation de SPAD et se décrit comme :

« Identification de la structure de SPAD optimale basée sur les résultats de caractérisation afin de déterminer les SPAD de prochaine génération. »

1.4.1 SPAD en CMOS

La technologie de microfabrication retenue pour ce projet est le procédé CMOS HV 0,8 μm de *Teledyne DALSA*. Ce procédé haut-voltage est offert par CMC Microsystems à faible coût. De plus, il offre la possibilité d'intégrer des circuits d'étouffement de façons monolithiques en 2D afin de comparer les résultats de caractérisation et évaluer l'impact de l'intégration 3D sur les performances des SPAD. Puisqu'il est destiné à des circuits de haut voltage, le procédé se base sur une couche d'épithaxie réputée pour avoir une faible densité de défauts, critère important pour la fabrication de SPAD. De plus, la technologie possède une grande variété d'implantation p et n offrant une grande flexibilité pour la conception. La structure du SPAD sera du type $p+n$ ayant un maximum de rendement quantique à $\sim 480 \text{ nm}$ [71], très près du maximum d'émission d'un scintillateur typique utilisé en TEP d'environ 420 nm.

Afin d'atteindre la finalité du projet, 2 ASIC en CMOS HV 0,8 μm ont été conçus, fabriqués et caractérisés. Le premier ASIC (premier prototype) contient 22 combinaisons de jonctions pn et sert à prouver le fonctionnement de SPAD dans cette technologie considérant les couches d'implantation du

procédé. Suite à la première itération, un second ASIC (deuxième prototype) a été développé et se divise en 5 ASIC. Ils contiennent différentes matrices de SPAD avec leurs circuits d'étouffement actifs. Ces structures servent à étudier le comportement des SPAD dans le but de déterminer la structure optimale et recommandée comme SPAD de prochaine génération. De plus, ce prototype contient 6 matrices de SPAD dédiées à une intégration 3D monolithique avec une matrice de circuits d'étouffement actifs de la même technologie CMOS et également une intégration hétérogène avec une matrice de circuits d'étouffement actifs développée en CMOS 0,13 μm et CMOS 65 nm. L'ASIC2 permet de valider le fonctionnement des matrices de SPAD dédiées au 3D.

CHAPITRE 2. THÉORIE DES PHOTODÉTECTEURS

Les photodétecteurs font la transduction de signaux optiques en signaux électriques, c'est-à-dire qu'ils produisent un courant par effet photoélectrique (photocourant) en fonction du flux de photons incidents. L'acquisition d'un signal lumineux se fait en trois étapes : la génération de porteurs par les photons incidents, le transport ou la multiplication des porteurs et l'extraction du signal électrique.

Cette section présente la théorie concernant les photodétecteurs sur silicium ainsi que sur leur intégration. Les considérations générales des détecteurs sur silicium seront présentées telles que le bruit d'obscurité, le rendement quantique et le temps de réponse. Finalement, la théorie concernant les photodiodes à jonction PIN, les photodiodes à avalanche (PDA), les photomultiplicateurs sur silicium (SiPM) ainsi que les diodes avalanche à photon unique (SPAD) sera décrite.

2.1 Caractéristiques des photodiodes

Les matériaux semi-conducteurs possèdent une bande interdite permettant à des photons d'être absorbés et d'émettre des porteurs libres. Lorsque ces porteurs sont soumis à un champ électrique, comme le champ électrostatique présent à la jonction *pn* d'une diode, les porteurs peuvent se séparer pour former un courant mesurable. C'est ainsi que le silicium est devenu un matériau de choix pour la photodétection grâce à son abondance, son faible coût, les propriétés de l'oxyde de silicium ainsi que la maîtrise de la transformation du matériau acquise par l'industrie au cours des années.

Une photodiode polarisée en inverse permet la détection de photons. À un point d'opération moins élevé que le point de chute (ou tension de claquage), le courant est pratiquement indépendant de la tension, mais plutôt fonction du taux de génération de porteurs par l'effet photoélectrique. Ces dispositifs permettent la génération d'un signal électrique proportionnel au flux de photons incidents. Opérés à une tension au-dessus de la tension de claquage, les diodes agissent comme un dispositif à déclenchement et permettent le comptage de photons, tel un compteur Geiger.

Cette sous-section décrit les principaux paramètres décrivant les jonctions *pn* soit le courant d'obscurité, le bruit, le rendement quantique et le temps de réponse.

2.1.1 Courant d'obscurité

Le courant mesuré aux bornes d'une photodiode provenant d'autres mécanismes que la photogénération s'appelle le courant d'obscurité (en anglais on l'appelle *dark current*). Ce courant provient de quatre principaux phénomènes : la génération Shockley-Read-Hall (SRH), la génération bande à bande, la génération bande à bande assistée de pièges et le courant de surface.

Les pièges profonds dans la structure cristalline du semiconducteur servent d'intermédiaires pour la génération et la recombinaison de porteurs par l'effet SRH [72] (figure 2.1). Les pièges profonds sont le résultat des impuretés introduites lors de la croissance du substrat ou lors de la microfabrication, généralement par des métaux lourds tels que le cuivre, l'or et l'argent, ainsi que des défauts dans la maille cristalline du substrat semi-conducteur [73]. La génération SRH est également fortement dépendante de la température. Ainsi, plus la température du substrat est élevée et plus la densité de pièges est élevée, plus la densité de porteurs générés par l'effet SRH est importante.

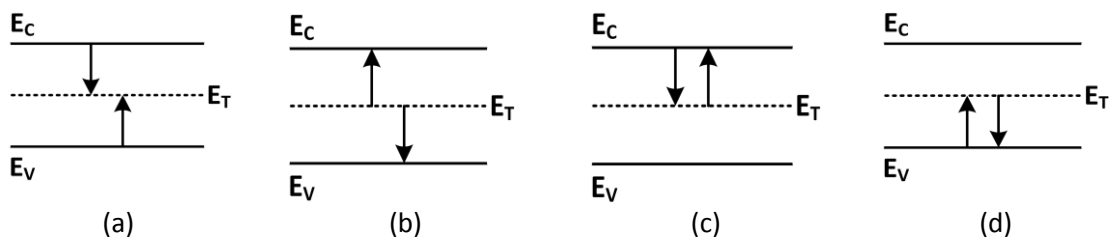


Figure 2.1 Pièges dans la bande interdite créant (a) de la recombinaison, (b) de la génération, (c) un piège à électron et (d) un piège à trou.

Des porteurs peuvent être générés également par effet tunnel à travers la jonction *pn* (appelé aussi génération bande à bande ou effet *Zener*). Ce phénomène survient lorsque le champ électrique dans la zone de déplétion est très élevé et courbe le diagramme de bande (figure 2.2). De cette façon, certains porteurs passent de la bande de valence à la bande de conduction. De plus, la figure montre que la génération bande à bande peut être assistée de pièges. Ainsi, pour les dispositifs utilisant l'ionisation par impact pour obtenir un gain comme les photodiodes avalanches, le dopage doit être suffisamment faible pour éviter d'avoir un champ électrique de jonction trop élevé et empêcher l'effet tunnel.

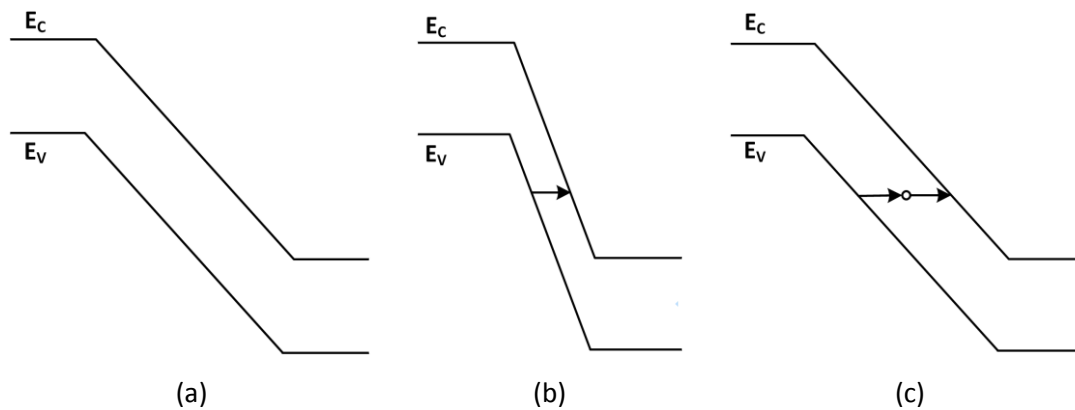


Figure 2.2 Schéma de bande à (a) faible champ, (b) fort champ montrant la génération bande à bande et (c) fort champ montrant la génération bande à bande assistée d'un piège.

Finalement, le courant de surface est un courant de fuite entre l'anode et la cathode et se produit en surface du dispositif et ne traverse pas la jonction pn . Il provient des pièges en surface du silicium et à l'interface Si-SiO₂ par exemple.

Pour les SPAD, le courant d'obscurité s'exprime plutôt en termes de taux de comptage en obscurité (DCR) et provient essentiellement des mêmes sources que le courant d'obscurité des jonctions pn opérées en mode linéaire à l'exception du courant de surface.

2.1.2 Bruit

Le bruit est une limitation importante pour les photodétecteurs puisqu'il détériore le ratio signal sur bruit et la résolution temporelle. Pour les détecteurs linéaires, le bruit est une variation stochastique spontanée du courant collecté par les électrodes.

Il y a principalement 3 sources de bruit intervenant dans les photodiodes opérées en mode linéaire soit le bruit *Johnson*, le bruit de grenaille et le bruit $1/f$. Le bruit *Johnson* ou le bruit thermique provient du mouvement aléatoire des porteurs engendrés par la température créant un bruit blanc [74]. Pour sa part, le bruit de grenaille (*Shot noise*) est causé par la nature discrète des charges composant le courant de jonction. Finalement, les pièges dans la structure cristalline et en surface du semiconducteur causent du bruit en basse fréquence appelé bruit $1/f$ [74].

Il n'est pas conventionnel de qualifier des SPAD en termes de bruit. Le bruit dans ce cas pourrait se définir comme une variation statistique spontanée du taux de comptage en obscurité (DCR), limitant la sensibilité du détecteur. Dans ce cas, le bruit est une variation stochastique d'événements aléatoires

et n'est pas analysé dans ce manuscrit. Dans cet ouvrage, on traite plutôt du DCR (section 2.4.4), de l'*afterpulsing* (section 2.4.5) et de la diaphonie (section 2.4.6).

2.1.3 Rendement quantique

Le rendement quantique se définit par la probabilité qu'un photon génère une paire électron-trou et que celle-ci soit détectée. Ainsi, le rendement quantique dépend du taux d'absorption dans la région active et de la probabilité de se rendre dans la région active, c.-à-d. de passer à travers les diverses couches de passivation recouvrant la jonction (généralement une couche d'oxyde ou de nitrure de silicium).

L'énergie des photons est égale à $h\nu$, où h est la constante de Planck et ν la fréquence de l'onde lumineuse. Sachant que la vitesse de la lumière c est égale à $\lambda\nu$, on peut déterminer la longueur d'onde limite maximum (λ_{lim}) pouvant être détecté par un semiconducteur :

$$\lambda_{lim} = \frac{hc}{E_g} \quad \text{Éq. 2.1}$$

où E_g est la bande interdite du matériau semi-conducteur. Pour le silicium, cette limite est de 1,1 μm .

D'autre part, la profondeur d'absorption de la lumière est fonction de λ , et est indiquée par le coefficient d'absorption α (cm^{-1}). Ce coefficient détermine la distance que la lumière parcourt pour que sa puissance diminue d'un facteur e (~ 2.7) [72]. La probabilité qu'un photon soit absorbé à une profondeur z est $P_a(z)$, et se définit comme la distribution de α [72] :

$$P_a(z) = \alpha e^{-\alpha z} \quad \text{Éq. 2.2}$$

La figure 2.3 montre le coefficient d'absorption dans le spectre visible pour plusieurs matériaux. On remarque que le spectre détectable du silicium se situe entre 400 et 1000 nm [20]. À ces longueurs d'onde, les photons sont absorbés à une profondeur moyenne variant de 100 nm à 100 μm respectivement. Pour détecter les photons infrarouges, le germanium peut être utilisé [20]. Ce dernier a un spectre de détection pouvant aller jusqu'à 1600 nm.

Dans le visible, plus l'énergie d'un photon est grande, plus il sera absorbé majoritairement près de la surface du matériau. À très faible énergie et donc aux plus grandes longueurs d'onde, les photons traversent complètement le matériau sans être détectés.

Comme il est démontré à la figure 2.4, pour une diode verticale $p+n$ (figure 2.7), plus l'épaisseur de la couche $p+$ est mince (d_t), plus l'absorption de photons de longueur d'onde courte est efficace. En effet, pour une couche $p+$ épaisse, les photons de faibles longueurs d'onde auront une plus grande chance d'être absorbés et de diffuser à la surface du substrat et de se recombiner avec des états d'interfaces au lieu d'être collectés par la région active [72]. En contrepartie, plus la zone de déplétion (W_e) est épaisse, plus il est possible de détecter des photons de longueur d'onde élevée.

De façon générale, en mode linéaire le rendement quantique (η) se définit comme le ratio du nombre de paires électrons-trous générées et de la puissance optique incidente. Une des façons de l'exprimer est :

$$\eta = \frac{I_{ph}}{q} \left[\frac{h\nu}{P_{opt}} \right] \quad \text{Éq. 2.3}$$

où I_{ph} est le photocourant, P_{opt} est la puissance optique et $h\nu$ est l'énergie des photons incidents [75].

Une portion des photons incidents à la photodiode seront réfléchis par les différentes couches couvrant la région active du détecteur. Il est possible d'évaluer la réflexion R de la lumière entre les interfaces des couches minces couvrant le détecteur avec la relation suivante :

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad \text{Éq. 2.4}$$

où n_1 et n_2 représentent les indices de réfraction des deux matériaux.

De plus, la transmission T des photons à une longueur λ spécifique peut s'optimiser en utilisant une seule couche d'épaisseur déterminée à la surface du silicium qui sert de couche antiréfléchissante [72].

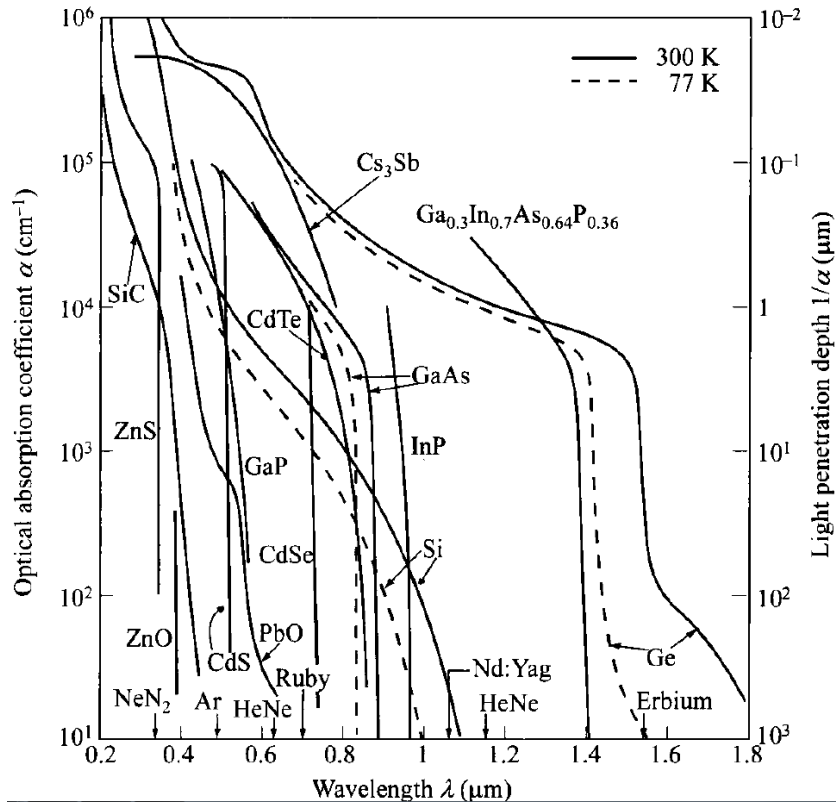


Figure 2.3 Coefficient d'absorption dans le spectre du visible pour différents matériaux (image tirée de [75]).

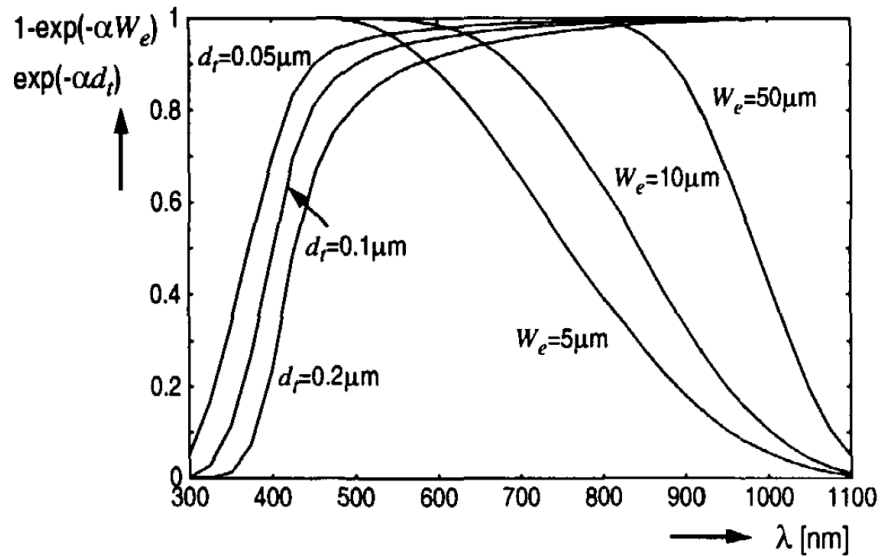


Figure 2.4 Nombre relatif de photons absorbés en fonction de la longueur d'onde pour différentes épaisseurs de la couche p+ (d_t) et de l'épaisseur de la zone de déplétion (W_e) pour une diode p+n verticale (image tirée de [72]).

2.1.4 Le temps de réponse

L'épaisseur de la zone de déplétion (W_e) joue un rôle très important dans la conception de photodiodes car elle influence directement le temps de réponse du détecteur et affecte sa résolution temporelle (section 2.4.3). En effet, les photoporteurs générés à l'extérieur de la zone de déplétions devront y diffuser pour déclencher une avalanche soutenue. Le phénomène de diffusion est très lent et augmente considérablement le temps de réponse des photodétecteurs. L'augmentation de la dimension de la zone de déplétion améliore la sensibilité du détecteur et diminue l'effet de diffusion des porteurs puisqu'ils seront absorbés en majorité dans la zone de déplétion. La capacité de la jonction se trouve également réduite ce qui offre de meilleures performances en temps. Quoiqu'elles soient plus capacitives, les jonctions peu profondes (faible d_i , figure 2.4) ont une meilleure PDP à plus faibles longueurs d'onde (autour de 450 nm), où les photons sont préférentiellement absorbés en surface [72].

2.2 Photodiode PIN

Les photodiodes *PIN* sont constituées d'une couche de matériau intrinsèque⁵, en sandwich entre deux zones dopées *p* et *n*. Lorsque la diode est polarisée en inverse, la zone de déplétion occupe la totalité de la région intrinsèque. Il est donc possible de contrôler l'épaisseur de la zone de déplétion (W_e) lors de la croissance des matériaux ou lors de la microfabrication permettant d'optimiser la sensibilité et le temps de réponse du dispositif. Le rendement quantique des diodes *PIN* dépend essentiellement de la dimension de la région intrinsèque du dispositif.

Le bruit rencontré avec ce type de dispositifs est principalement du bruit de grenaille causé par une variation statistique de porteurs générés thermiquement.

2.3 Photodiode à avalanche

Le mécanisme de claquage d'une photodiode à avalanche (PDA) est principalement causé par l'ionisation par impact. Ce phénomène survient lorsqu'un porteur minoritaire gagne suffisamment

⁵ La couche de matériau intrinsèque est plus souvent une couche crue par épitaxie dopée très faiblement et de haute résistivité [74].

d'énergie cinétique pour ioniser la structure cristalline du matériau et créer des paires électrons-trous secondaires. De cette façon, un seul photoporteur créer une série de porteurs, telle une avalanche. Opérée dans ce régime, une PDA a un gain de 50 à 200 [18].

Le gain des PDA se fait au détriment de bruit élevé comparativement aux diodes PIN dû à la nature aléatoire du processus d'ionisation par impact [18, 75]. Le bruit dépend de la variation du gain de chaque photoporteurs et dépend donc fortement du ratio du coefficient d'ionisation des trous sur le coefficient d'ionisation des électrons (α_p/α_n) ainsi que du facteur de multiplication. Ainsi, il est désirable que l'ionisation se fasse principalement par un seul type de porteurs, idéalement par les électrons pour le silicium puisque $\alpha_n > \alpha_p$ [75].

2.4 Diode avalanche à photon unique

Une diode avalanche s'opère au-dessus de la tension de claquage en régime de *photon unique*. Le détecteur est alors appelé diode avalanche à photon unique ou SPAD. Dans ce régime, un photon déclenche un claquage de la jonction générant une grande impulsion de courant permettant le comptage de photons.

Cette section présente en détail le fonctionnement des SPAD et leurs performances caractérisées en termes de probabilité de détection (PDP), de résolution temporelle et de taux de comptage en obscurité (DCR, *afterpulsing* et diaphonie). La section présente également une revue de littérature de SPAD fabriqués en technologie CMOS ainsi que les caractéristiques des SPAD fabriqués par des procédés dédiés à l'optoélectronique.

2.4.1 Principe de fonctionnement

Lorsqu'une PDA est polarisée au-dessus de sa tension de claquage, un seul porteur suffit à déclencher une avalanche divergente de porteurs, tel qu'il est démontré à la figure 2.15 (a). Ce régime de fonctionnement de la photodiode avalanche s'appelle également le régime *Geiger*.

La tension de claquage se définit arbitrairement comme la tension inverse à laquelle on mesure un courant de 100 μA [76]. La figure 2.15 (b) représente le point d'opération d'un SPAD sur une courbe *I/V* comparativement à celui d'une PDA. Le point d'opération du SPAD se définit par la tension excédentaire à la tension de claquage V_E .

Le fort courant de charge généré par le SPAD se détecte par un circuit d'étouffement qui abaisse la tension de polarisation pour arrêter l'avalanche et ensuite recharger la jonction avec les conditions d'origine en l'attente d'un nouveau photon.

Les SPAD peuvent être étouffés avec des circuits actifs ou passifs. Un circuit actif peut étouffer les SPAD plus rapidement et il est possible d'ajuster le temps mort pour optimiser les performances du dispositif (section 2.4.5). Les circuits passifs permettent d'obtenir un temps mort d'environ maximum 75 ns [77], et les circuits actifs permettent d'obtenir des temps morts <10 ns [78]. Il est ainsi possible avec les circuits d'étouffement actifs d'optimiser la probabilité de détection (PDP) au détriment de l'*afterpulsing*, tel qu'il est démontré à la section 2.4.5. Plus le temps mort est court, plus la PDP est élevée, mais plus la probabilité d'*afterpulsing* est élevée, un problème important pour plusieurs applications [68].

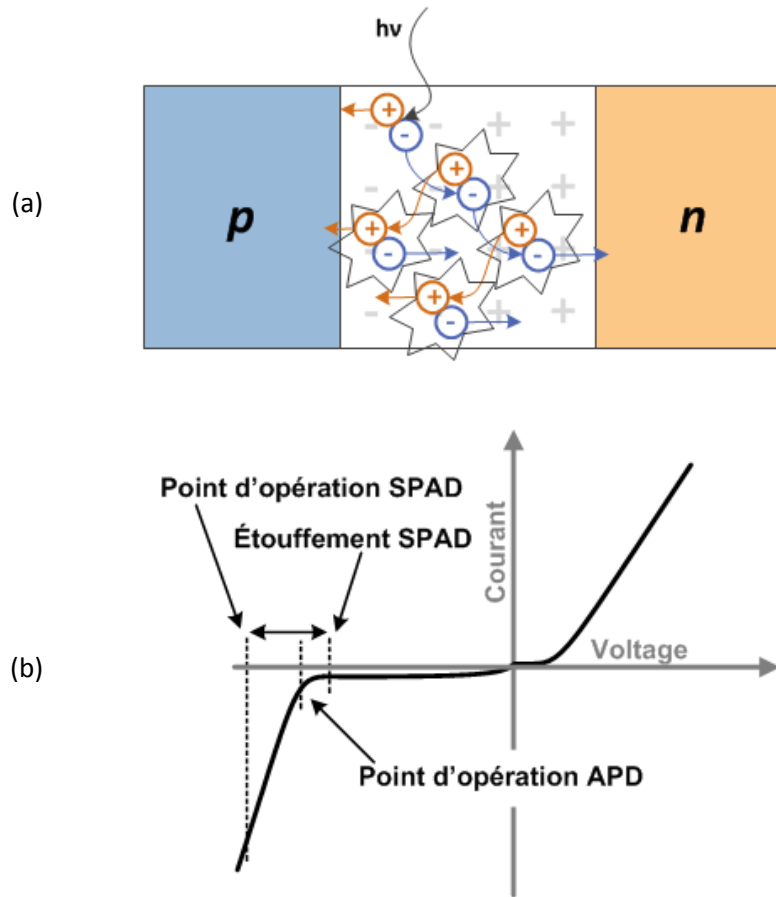


Figure 2.5 (a) Représentation de l'ionisation par impact créant une avalanche soutenue de porteurs et (b) représentation de la courbe I/V d'une photodiode opérée en régime linéaire et en régime *Geiger*.

2.4.2 Probabilité de photodétection

Cette section présente la probabilité de détection d'un SPAD $p+n$. Un photoporteur généré dans un SPAD a une certaine probabilité P_D de déclencher le claquage de la jonction. Donc, P_D , le rendement quantique de la jonction η (section 2.1.3) ainsi que la surface photosensible F_R (dans le cas d'une matrice de SPAD) détermine la probabilité de photodétection (PDP). La relation s'exprime de façons générales selon :

$$PDP = \eta \times P_D \times F_R$$

Éq. 2.5

La probabilité de détection d'une matrice de SPAD est directement proportionnelle au ratio de la surface photosensible du détecteur sur la surface totale. Ce ratio s'appelle facteur de remplissage F_R (section 2.4.9).

La plupart des SPAD fabriqués en technologies CMOS sont recouverts de plusieurs couches diélectriques servant à l'isolation des métaux. Ces couches agissent malheureusement comme un filtre interférentiel à certaines longueurs d'onde ayant pour effet de réduire le rendement quantique des jonctions et donc la PDP des SPAD, comme le montre la figure 2.6 (a). Dépendamment de l'épaisseur des couches d'oxyde, de 10 à 40 % de la lumière incidente peut être ainsi perdue.

Avec un procédé de fabrication dédié, il est généralement possible d'utiliser une couche antiréfléchissante pour recouvrir les SPAD. Les pertes peuvent ainsi être réduites à moins de 10 % dans tout le spectre du visible. L'allure de la PDP est alors uniforme comme le montre la figure 2.6 (b) [79].

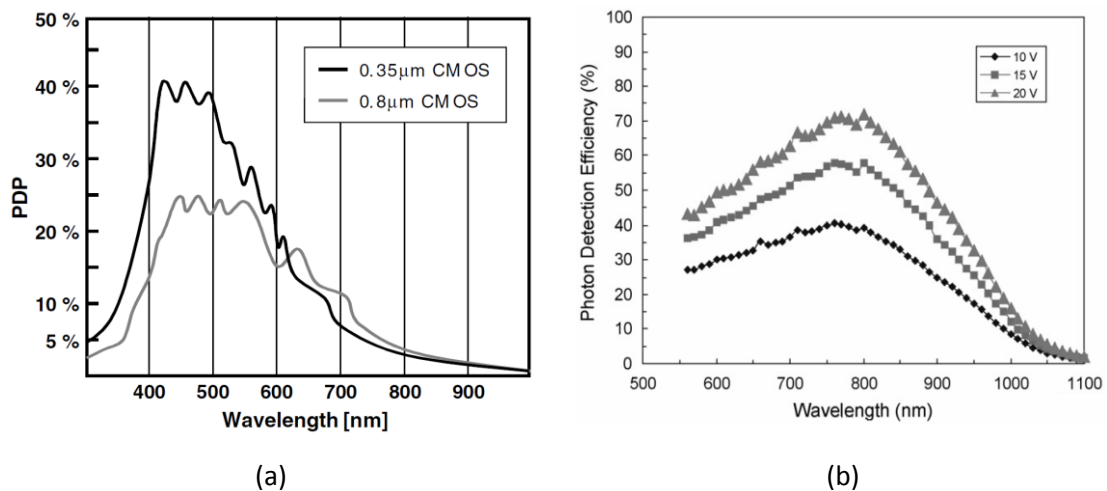


Figure 2.6 Exemple d'une courbe de PDP⁶ en fonction de la longueur d'onde pour (a) deux SPAD fabriqués en technologie CMOS 0,35 μm et 0,8 μm montrant une allure non uniforme (image tirée de [80]) et (b) un SPAD à illumination par l'arrière en technologie dédié à l'optoélectronique utilisant une couche antiréfléchissante (image tirée de [79]).

La probabilité qu'un photon soit détecté par un SPAD $p+n$ s'exprime en additionnant la probabilité de détection des photons dans 3 régions distinctes, tel qu'il est présenté à la figure 2.7. Dans chacune de ces régions, la probabilité de détection dépend de la probabilité de générer une paire électron-trou (Éq. 2.2) et de la probabilité que cette dernière déclenche le claquage de la jonction.

⁶ Photon detection efficiency (PDE) et Probabilité de photodétection (PDP) sont des synonymes.

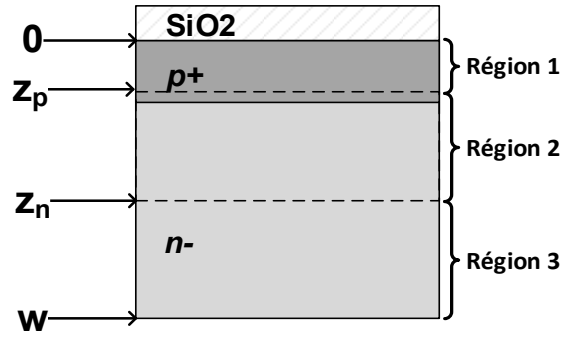


Figure 2.7 Les trois régions utilisées pour le modèle du calcul de la PDP utilisé.

D'abord, la région 1 couvre la zone neutre à la surface du substrat et se situe dans la région p^+ . Les photoélectrons générés dans cette région ont une probabilité d'atteindre la zone de déplétion (région 2) par diffusion (P_{de}) et ont une probabilité de déclencher le claquage de la jonction (P_e).

La région 2 représente la zone d'appauvrissement définie entre z_p et z_n . Les photons absorbés dans cette région génèrent des paires *électrons-trous* et ces derniers ont une probabilité de déclencher le claquage de la jonction (P_p).

Finalement, la région 3 représente la zone neutre dopée n^- sous la zone de déplétion et se situe entre z_n , la limite de la zone de déplétion de la jonction et w , la limite du substrat. Dans le cas où la région n^- est dans un substrat p , w se définit par le début de la zone de déplétion de la jonction n^- /substrat p . Les photo-trous générés dans cette région ont une probabilité de diffuser dans la zone de déplétion (P_{dh}) et de déclencher le claquage de la jonction (P_h).

Ainsi, considérant une transmission de 100 % des photons dans le détecteur, la PDP d'une jonction $p+n$ peut s'exprimer par [72] :

$$PDP = F_r \left(\overbrace{\int_0^{z_p} P_a(z) P_{de}(z) P_e dz}^{\text{Région 1}} + \overbrace{\int_{z_n}^{z_p} P_a(z) P_p dz}^{\text{Région 2}} + \overbrace{\int_{z_p}^w P_a(z) P_{dh}(z) P_h dz}^{\text{Région 3}} \right) \quad \text{Éq. 2.6}$$

où les différents paramètres sont expliqués précédemment et P_a se calcule selon l'éq. 2.2. P_p et P_a se modélise selon [41] ainsi que P_{de} et P_{dh} selon [75].

Les SPAD à plus grand volume, c'est-à-dire ayant une zone de déplétion de plus grand volume, et les diodes de type *reach-through* présentent de meilleure PDP [81]. La zone de déplétion de ces diodes

atteint une épaisseur de 20 à 100 μm et permet d'obtenir une probabilité d'absorption élevée pour les photons de plus grandes longueurs d'onde (figure 2.4) [52].

2.4.3 Résolution temporelle

Pour plusieurs applications, un SPAD doit avoir une bonne résolution temporelle. Cette résolution est une variation statistique de la mesure du délai entre l'interaction d'un photon dans le SPAD et le signal émis par le SPAD. La résolution temporelle (aussi appelée gigue temporelle et en anglais *timing jitter*) s'exprime par la largeur à la mi-hauteur (LMH) d'un lissage gaussien de l'histogramme de mesures des délais.

Comme il est montré à la figure 2.8, l'histogramme se caractérise par deux parties distinctes; un pic gaussien et une queue d'atténuation exponentielle souvent représentée par une mesure de la largeur à un centième de la hauteur ($L1/100H$). Le pic gaussien provient des photons absorbés dans la zone de déplétion.

La variation statistique de ces photons est influencée par la nature statistique de l'ionisation par impact [82]. La limite physique de la résolution temporelle se détermine par le temps pris par un photoporteur pour traverser la zone de déplétion à vitesse saturée par le champ électrique. Dans une jonction *pn* sur silicium avec une zone de déplétion de 1 μm , cette limite est typiquement de 10 ps [82]. Aussi, la résolution temporelle est influencée par la propagation latérale de l'avalanche dans le dispositif par dérive, ou par photo-émission [81]. L'effet de la dérive latérale de l'avalanche provient de la fluctuation du champ électrique causée par une grande concentration de porteurs à l'endroit de l'avalanche par rapport au reste de la zone de déplétion. Ainsi, si une avalanche est déclenchée dans un coin de la diode, elle prendra plus de temps à se propager que si elle est déclenchée au centre de la zone de multiplication [72].

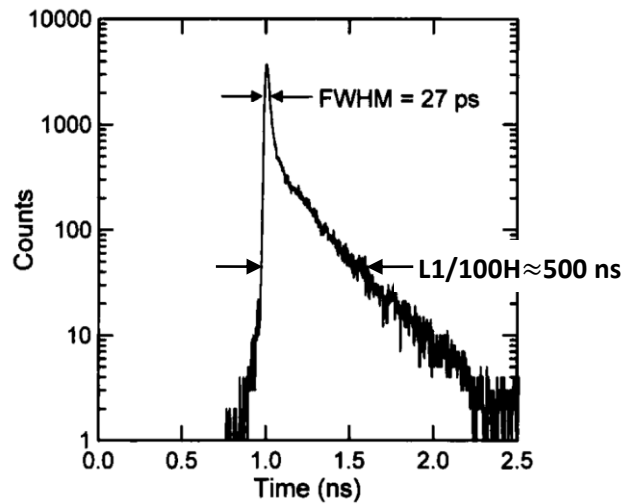


Figure 2.8 Exemple du résultat d'une mesure en temps d'un SPAD montrant le nombre de comptes en fonction du temps (image tirée de [52]).

Certains photoporteurs sont générés à l'extérieur de la zone de déplétion et diffusent jusqu'à la zone de multiplication pour déclencher le claquage de la jonction. Ce phénomène de diffusion lent engendre une grande fluctuation statistique de la réponse en temps des photons absorbés à l'extérieur de la zone de déplétion [82]. Ce phénomène explique la queue dans le spectre de résolution temporelle. Ce paramètre provient des photons absorbés à l'extérieur de la zone de déplétion et s'exprime souvent par la largeur à un centième de la hauteur maximale ou $L1/100H$.

La résolution temporelle des SPAD s'améliore en augmentant les coefficients d'ionisation (α_e) et (α_i) par une augmentation de la tension de polarisation, c'est-à-dire la tension excédentaire (V_E) [82]. La résolution temporelle s'améliore aussi avec une réduction de la capacité de jonction du SPAD. Donc, plus le SPAD est petit, meilleure sera sa résolution temporelle. De plus, la capacité de jonction varie en fonction du volume de la zone de déplétion. Avec une tension de claquage plus élevée, un SPAD a une capacité de jonction plus faible et une meilleure résolution temporelle [81]. Pour atteindre des résolutions temporelles de quelques dizaines de picosecondes, les SPAD doivent avoir un diamètre généralement de 5 à 20 μm [83].

2.4.4 Taux de comptage en obscurité

Les SPAD se déclenchent par des paires électrons-trous générées par des photons, mais aussi par des paires électrons-trous générées par la génération Shockley-Read-Hall (SRH), bande à bande et bande à bande assistée de pièges. De façons similaires au courant d'obscurité des photodiodes (section

2.1.1), ces effets induisent un *taux de comptage en obscurité* non-désiré, ou en anglais *Dark Count Rate* (DCR). Ce dernier s'exprime en nombre d'évènements par seconde mesurés en obscurité. Il est communément exprimé relativement à la surface du capteur c'est-à-dire en $s^{-1}\mu m^{-2}$.

Certains auteurs définissent le taux de comptage en obscurité (DCR) comme du bruit. Or, il semble beaucoup plus adéquat de définir le bruit des SPAD plutôt comme une variation statistique du DCR. Le bruit et le DCR sont présentés dans cet ouvrage comme deux paramètres distincts.

Génération thermique et Shockley-Read-Hall

Lorsque le produit des porteurs pn dévie de la densité de porteur intrinsèque n_i^2 , un phénomène de génération et recombinaison par l'entremise de pièges profonds permettra de rétablir l'équilibre dans le matériau. La génération thermique par l'entremise de pièges, appelée génération SRH, contribue à un taux de comptage indésirable dans les SPAD appelés DCR.

Le DCR dépend étroitement de la température et de la densité de défauts dans les structures cristallines du détecteur. Plus la densité de défauts est élevée et plus la température est élevée, plus le DCR est important.

Génération bande à bande

Le phénomène de génération bande à bande tel que présenté à la figure 2.2 génère des trous dans la bande de valence et des électrons dans la bande de conduction pouvant déclencher le claquage de jonctions. Le phénomène survient quand le champ électrique intrinsèque de la jonction est suffisamment élevé ($>5 \times 10^5$ V/cm). Une tension de claquage d'une jonction pn faible indique la présence de génération bande à bande.

La valeur de la tension de claquage permet donc d'évaluer les mécanismes de claquage d'une photodiode. Typiquement, une jonction $p+n$ dans du silicium présentant une tension de claquage inférieur à 25 V indique la présence de génération bande à bande, détériorant le DCR si elle est opérée en mode *Geiger* [72].

2.4.5 Afterpulsing

Lorsqu'un SPAD claque, l'ionisation par impact des porteurs génère une charge importante dans la diode remplissant des pièges profonds de porteurs. Lorsque le fort courant est étouffé et que le SPAD

est rechargé, les porteurs piégés peuvent se libérer et déclencher à nouveau le claquage de la jonction corrélée au premier claquage que l'on appelle *afterpulsing*. Ces événements non désirables posent problème lorsque le temps de vie des pièges est supérieur au temps mort du circuit d'étouffement. Donc, en plus d'augmenter le DCR par l'entremise de la génération SRH, les pièges profonds causent également de l'*afterpulsing*.

L'*afterpulsing* dépend de quatre facteurs. Premièrement, il dépend de la concentration de pièges dans la structure cristalline située dans la zone de multiplication et particulièrement du temps de vie de ceux-ci. Plus grande est la concentration de pièges à temps de vie long (plusieurs dizaines de nanosecondes), plus la probabilité d'*afterpulsing* est élevée⁷. Deuxièmement, il dépend de la température. Une température basse augmente le temps de vie des pièges et augmente la probabilité d'*afterpulsing*. Troisièmement, il dépend du temps mort du circuit d'étouffement. Un temps mort long permet à une grande partie des porteurs piégés de se libérer avant que le SPAD soit réamorcé [68]. Quatrièmement, l'*afterpulsing* dépend de la charge de l'avalanche Q_a , proportionnelle à la tension excédant la tension de claquage (V_E) et à la capacité équivalente du système (C_E) [76] :

$$Q_a \approx C_E V_E \quad \text{Éq. 2.7}$$

Pour diminuer l'*afterpulsing*, il faut donc réduire V_E et C_E . De plus, on peut limiter la charge Q_a en étouffant rapidement l'avalanche divergente, c.-à-d. en utilisant un circuit d'étouffement actif avec une faible tension de seuil.

2.4.6 Diaphonie

Pour augmenter la densité de photons détectables et améliorer leurs plages d'opération, les SPAD peuvent s'intégrer en matrices. Ces matrices présentent des événements indésirables corrélés entre les SPAD appelés diaphonie. Deux types de diaphonie sont décrits, la diaphonie optique et électrique.

⁷ Cette déclaration a une limite. Dans le cas des pièges à temps de vie très long, de plus de 10 μ s, ils peuvent être suffisamment long pour voir passer plusieurs claquages avant de relâcher leurs porteurs et créer une avalanche indésirable. Ces pièges causent un taux moins important de claquage et contribuent ainsi moins au taux de comptage d'événements indésirables. De cette façon, ils contribuent de façon moins importante à la probabilité d'*afterpulsing*.

La diaphonie optique provient de photons émis par rayonnement Bremsstrahlung. Cette émission de photons survient lors de la décélération d'un électron lors de l'avalanche par un noyau. Le claquage déclenché par un photon Bremsstrahlung absorbé près ou à l'intérieur de la région photosensible d'un SPAD voisin génère de la diaphonie. Selon l'endroit où le photon est absorbé, le photoporteur déclenche le claquage quasi instantanément (<1 ns) ou avec un délai correspondant au temps de diffusion et cause un claquage retardé [79]. Les photons Bremsstrahlung émis durant le processus d'avalanche couvrent un spectre d'émission de 0,5 à 3 eV [72]. Le spectre d'émission semble varier selon la technologie de microfabrication utilisée. On estime qu'une centaine de photons sont émis par claquage avec un circuit d'étouffement passif [84]. Lorsque la longueur d'onde moyenne émise est élevée, les photons peuvent être réfléchis sur la face arrière du substrat, augmentant la probabilité de diaphonie quasi instantanée [85].

Il existe également de la diaphonie électrique causée par la diffusion de porteurs d'une SPAD à l'autre causant un déclenchement intempestif corrélé. Ce phénomène génère donc de la diaphonie retardée et peut-être évité en utilisant une jonction *pn* autour du SPAD servant à l'isolation [79].

La diaphonie directe se définit comme étant de la diaphonie entre deux SPAD adjacents, comme entre le SPAD S6 et S5 de la figure 2.9. La figure montre également de la diaphonie en diagonale, entre les SPAD S3 et S5. Ces cas de figure sont de premier ordre.

La diaphonie de deuxième ordre est l'interaction par la diaphonie entre deux SPAD en passant par un SPAD intermédiaire. La figure montre de la diaphonie de deuxième ordre entre les SPAD S8 et S1. Le SPAD S8 déclenche le SPAD S4 qui déclenche à son tour le SPAD S1 par de la diaphonie de premier ordre.

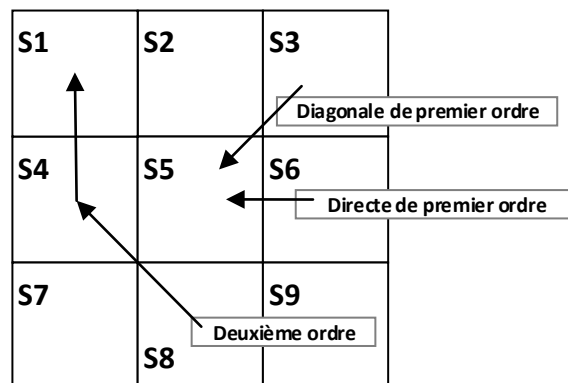


Figure 2.9 Matrice de 3×3 SPAD (S1 à S9) montrant de la diaphonie directe et en diagonale ainsi que de la diaphonie de premier et deuxième ordre.

La diaphonie engendre une image floue dans les applications de caméra 3D [6] et cause une surestimation de la mesure en énergie d'un évènement lumineux. La diaphonie peut être réduite principalement en augmentant l'espace mort entre les SPAD et en les isolant par une jonction pn . L'espace mort se définit par la distance entre les régions p^+ de deux SPAD adjacents. Par contre, l'espace mort diminue la PDP et le facteur de remplissage des matrices de SPAD (section 2.4.9).

Effet de la diaphonie sur le taux de comptage

L'intégration de SPAD en matrice augmente le taux de comptage en obscurité totale T (incluant le DCR, l'*afterpulsing* et la diaphonie) des SPAD par le biais de la diaphonie. Pour apprécier l'impact de la diaphonie sur le taux de comptage en obscurité totale T , un modèle d'interactions des évènements d'une matrice 3×3 est présenté.

La figure 2.10 montre les différentes interactions de diaphonie possibles (directe, diagonale, de premier ordre et de second ordre) dans une matrice 3×3 . Ces interactions affectent le taux de comptages des cellules 00 , 01 et 11 (T_{00} , T_{01} et T_{11}). Ces trois cas permettent d'évaluer le taux de comptage de toutes les cellules puisqu'on suppose que $T_{00}=T_{02}=T_{20}=T_{22}$ et que $T_{01}=T_{10}=T_{12}=T_{21}$.

La figure 2.10 (a), (b) et (c) montre les possibilités de diaphonie directe et en diagonale de premier ordre pour les trois cas. La figure 2.10 (d), (e) et (f) montre les possibilités de diaphonie de deuxième ordre pour les trois cas. La diaphonie de troisième ordre (et plus) est négligée ainsi que la diaphonie de premier ordre avec le deuxième voisin (par exemple la diaphonie de premier ordre directe entre la cellule 00 et 02).

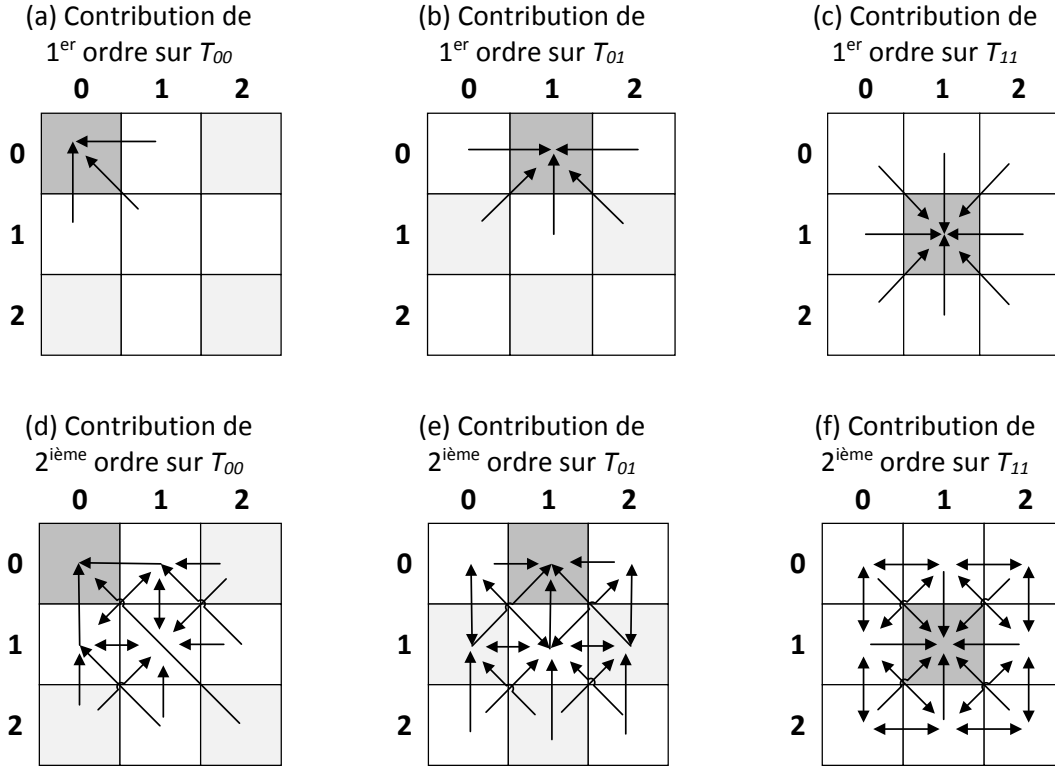


Figure 2.10 Interactions possibles de la diaphonie directe et en diagonale de premiers ordres des cellules (a) 00, (b) 01 et (c) 11 ainsi que les interactions possibles de diaphonie de deuxième ordre des cellules (d) 00, (e) 01 et (f) 11.

Pour les besoins de la modélisation, on suppose que chaque cellule possède le même DCR (taux de comptage des porteurs thermiques essentiellement), la même probabilité d'*afterpulsing* P_a , la même probabilité de diaphonie directe P_c et la même probabilité de diaphonie en diagonale P_{cd} , fixée de façon empirique à 5 % de P_c [86].

Ainsi, le taux de comptage total T (incluant le DCR, l'*afterpulsing* et la diaphonie) pour les trois cellules se modélise selon :

$$T_{00} = DCR(1 + P_a) + \overbrace{2P_c T_{01} + P_{cd} T_{11}}^{\text{Premier ordre}} + \overbrace{6P_{cd} P_c T_{01} + P_{cd}^2 T_{00} + 2P_c^2 T_{00} + 4P_{cd} P_c T_{00} + 2P_c^2 T_{11}}^{\text{Deuxième ordre}} \quad \text{Éq. 2.8}$$

$$T_{01} = DCR(1 + P_a) + \overbrace{2P_c T_{00} + P_c T_{11} + 2P_{cd} T_{01}}^{\text{Premier ordre}} + \overbrace{8P_{cd} P_c T_{00} + 4P_{cd} P_c T_{11} + 5P_c^2 T_{01} + 2P_{cd}^2 T_{01}}^{\text{Deuxième ordre}} \quad \text{Éq. 2.9}$$

$$T_{11} = DCR(1 + P_a) + \overbrace{4P_c T_{01} + 4P_{cd} T_{00}}^{\text{Premier ordre}} + \overbrace{16P_{cd} P_c T_{01} + 8P_c^2 T_{00}}^{\text{Deuxième ordre}} \quad \text{Éq. 2.10}$$

La figure 2.11 montre T_{11} / DCR , représentant l'augmentation du taux de comptage par rapport au DCR d'un SPAD, en fonction d'une variation de diaphonie directe P_c de 0 à 15 % et d'*afterpulsing* de 0 à 20 %.

À $P_c = 0$, la figure permet d'apprécier uniquement la contribution de l'*afterpulsing* sur T_{11}/DCR . On constate que la diaphonie a un impact plus important sur le DCR principalement pour $P_c > 0,1$ où l'on double le taux de comptage du SPAD 11 ($T_{11}/\text{DCR} = 2$). La figure montre qu'avec $P_c < 0,05$ et $P_o < 0,1$ le taux de comptages du SPAD 11 augmente de 20 %.

Les résultats de ce modèle permettent d'évaluer la diaphonie visée par les matrices de ce projet à moins de 10 % pour éviter une augmentation trop importante du taux de comptage en obscurité total des SPAD de la matrice.

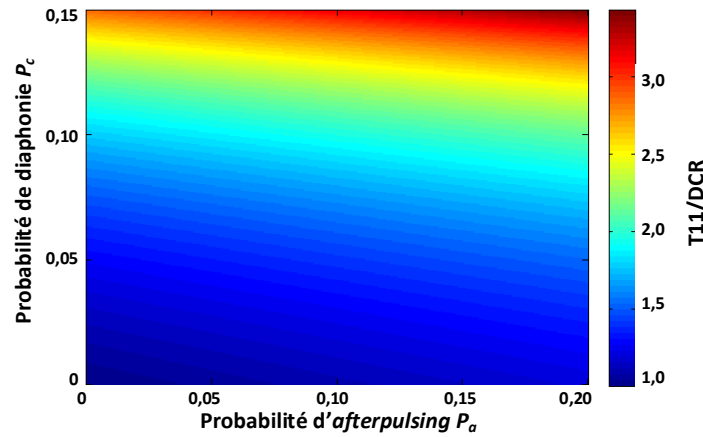


Figure 2.11 Taux de comptage normalisé T_{11}/DCR en fonction de la probabilité de diaphonie directe P_c et d'*afterpulsing* P_o .

2.4.7 Microfabrication de SPAD

Cette section présente les défis liés à la microfabrication de SPAD principalement pour prévenir le claquage latéral des jonctions pn .

Structure $p+n$

Une des structures typiques de SPAD conçu en CMOS est basée sur une jonction $p+n$. Dans cette structure, le puits n dans lequel le SPAD est conçu joue un rôle important dans le comportement du SPAD. Un puits profond permet aux porteurs absorbés en profondeur de diffuser jusqu'à la zone de déplétion. Un puits profond favorise donc la détection d'une plus grande quantité de lumière et améliore la PDP particulièrement à longueur d'onde plus élevée. Par contre, il favorise la diffusion d'une plus grande densité de porteurs thermiques, ayant pour effet d'augmenter le DCR. Aussi, dans le cas d'une structure $p+n$, le dopage du puits n donnera l'allure du profil du champ électrique de la jonction.

Une jonction plus large permet d'augmenter la PDP, de réduire la capacité de jonction, de réduire l'*afterpulsing* et d'améliorer la résolution temporelle.

Prévention du claquage latéral

Le mécanisme de claquage des SPAD doit être majoritairement l'ionisation par impact. De plus, le claquage doit se produire dans la région photosensible du SPAD pour favoriser la détection de photon, c.-à-d. que le claquage vertical doit être favorisé au détriment du claquage latéral. De plus, afin de réduire le DCR, le champ électrique latéral des jonctions doit être diminué pour limiter la génération bande à bande.

Il existe deux types de claquage latéral, le claquage de la jonction cylindrique V_C , illustrée à la figure 2.12 (a), ainsi que le claquage de la jonction sphérique V_{SP} , figure 2.12 (b).

La figure 2.12 (c) présente le ratio V_C/V_{BD} et V_{SP}/V_{BD} en fonction du ratio r_j/W_{Dm} , où V_{BD} est le claquage vertical de la jonction (c.-à-d. sans claquage latéral), r_j le rayon de courbure cylindrique et sphérique et W_{Dm} l'épaisseur de la zone de déplétion. La figure montre que les ratios V_{SP}/V_{BD} et V_C/V_{BD} sont maximums pour un ratio r_j/W_{Dm} entre 0,4 et 1 [75].

Afin d'augmenter le claquage de la jonction cylindrique V_C , on utilise un anneau de garde. De cette façon, le ratio r_j/W_{Dm} ainsi que le ratio V_C/V_{BD} se retrouvent augmentés.

Pour réduire le claquage de la jonction sphérique V_{SP} , on augmente la courbure du SPAD r_j lors de la conception des schémas de masque. De cette façon, le ratio r_j/W_{Dm} ainsi que le ratio V_C/V_{BD} se retrouvent augmentés.

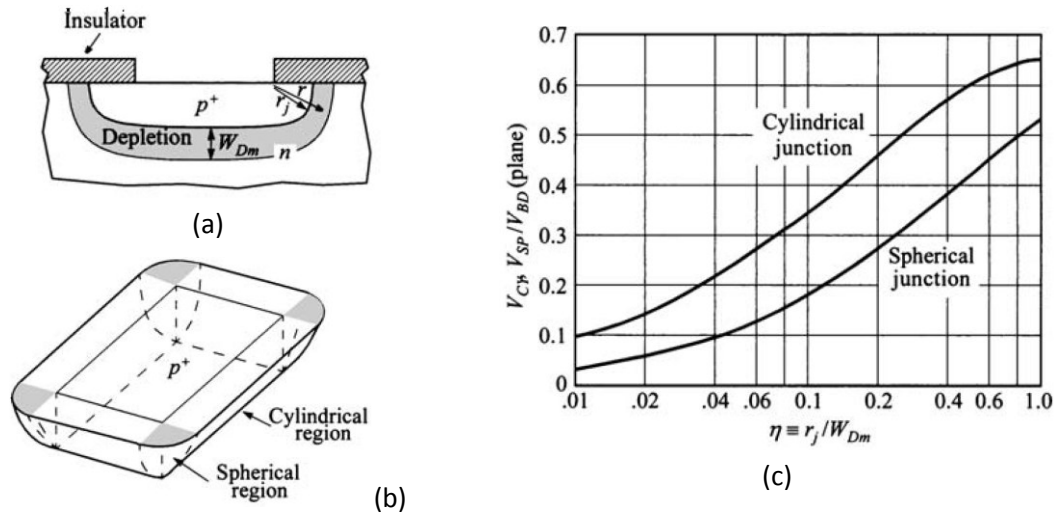


Figure 2.12 (a) Diffusion des porteurs d'une jonction crée une courbure de la jonction cylindrique de rayon r_j . (b) Vue en trois dimensions montrant la jonction sphérique. (c) Tension de claquage normalisée de la jonction sphérique et cylindrique en fonction du rayon normalisé. (images tirées de [75]).

La figure 2.13 présente plusieurs méthodes utilisées pour concevoir un anneau de garde et réduire l'impact du claquage de la jonction cylindrique. Une méthode de prévention du claquage latéral consiste à utiliser une région dopée faiblement p aux extrémités de la région dopée fortement p , tel que montré à la figure 2.13(a). On appelle cette structure, *anneau de garde par diffusion*. Cette technique permet d'obtenir un champ électrique beaucoup plus important sous la jonction ($p+n$) et plus faible sur la périphérie ($p-n$). Elle favorise donc le claquage vertical du SPAD plutôt que latéral.

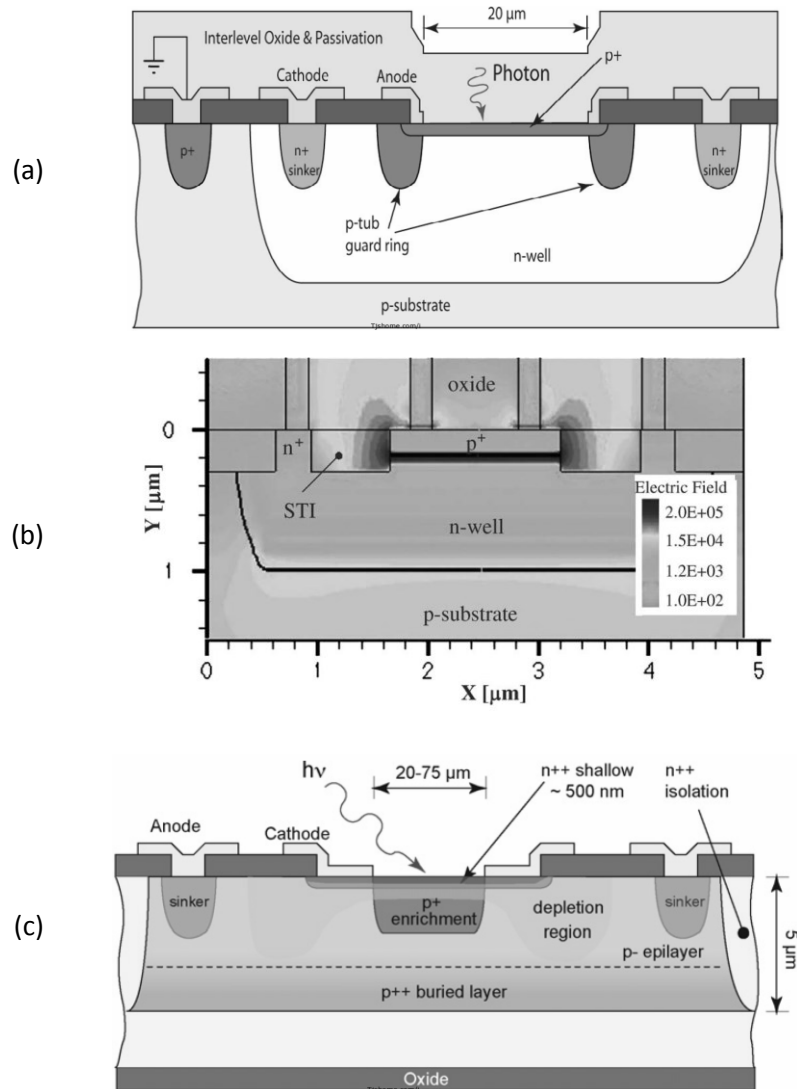


Figure 2.13 (a) SPAD en CMOS 0,35 μm avec anneau de garde par diffusion utilisant un *p-tub* (image tirée de [87]), (b) SPAD en CMOS 0,18 μm avec anneau de garde par des *Shallow Trench Isolation* (STI) (image tirée de [88]), et (c) SPAD en CMOS 0,35 μm avec anneau de garde virtuel (image tirée de [87]).

Dans le cas des SPAD fabriqués en technologies CMOS plus petites que 0,35 μm, les tranchées d'isolation étroites (en anglais *shallow trench isolation* ou STI) peuvent être utilisées pour favoriser le claquage vertical en diminuant le champ électrique aux extrémités des SPAD, comme il est montré à la figure 2.13(b). Pour les transistors, ces cavités gravées dans le substrat de silicium et remplies de SiO₂ servent à isoler les transistors. Les STI préviennent le claquage (en anglais appelé *punchthrough*) et des courts-circuits indésirables (en anglais appelé *latch-up*) des transistors [88]. Ces cavités permettent de

faire des anneaux de garde plus compacts qu'avec les anneaux de gardes par diffusion parce que la rigidité diélectrique⁸ du SiO₂ est jusqu'à 30 fois plus élevée que pour le silicium [75].

La dernière méthode consiste à utiliser un *anneau de garde virtuel*. Dans le cas où l'on désire avoir un SPAD $n+p$, la méthode consiste à créer une zone de multiplication avec une jonction $n++p+$ dans un puits $p-$. La figure 2.13(c) montre la cathode avec un plus grand diamètre que la région $p+$, le champ électrique sera plus faible dans les coins du SPAD permettant de favoriser le claquage vertical.

Malheureusement, toutes ces méthodes engendrent une perte de l'aire photosensible par rapport à la surface totale du détecteur, et donc une diminution de la PDP pour une même surface. En contrepartie, il est essentiel d'utiliser une méthode pour prévenir le claquage latéral qui empêche le fonctionnement des PDA en mode Geiger.

2.4.8 Circuits d'étouffement

Pour être opérée en mode Geiger, une photodiode à avalanche doit être polarisée au-dessus de la tension de claquage. Cette tension de polarisation doit être contrôlée par un circuit qui abaisse la tension de polarisation lorsqu'une avalanche incontrôlée est déclenchée et ensuite polarise la diode à nouveau au-dessus de la tension de claquage. Ces circuits d'étouffement peuvent être actifs ou passifs [79].

Circuits d'étouffement passifs

Les circuits passifs permettent d'étouffer automatiquement les SPAD par une baisse de potentiel engendrée par le courant d'avalanche à travers une résistance de valeur élevée (figure 2.14). La capacité équivalente à la cathode (C_e) de ce système est égale à :

$$C_e \approx C_d + C_c + C_{ic} \quad \text{Éq. 2.11}$$

où C_d est la capacité de la zone de déplétion, C_c la capacité de la cathode et C_{ic} la capacité d'interconnexion de la cathode à la résistance d'étouffement R_q . Les capacités d'interconnexion à

⁸ La rigidité diélectrique est la différence de potentiel maximale qu'un isolant peut supporter sans claquer.

l'anode C_{ia} et de sortie C_{io} ne sont pas prises en compte puisque R_s est de faible valeur (typiquement 50Ω [76]).

La constante de temps d'éteuffement τ_q est estimée à $C_e R_D$ (puisque $R_D \ll R_q$), où R_D est la résistance de la jonction :

$$\tau_q = C_e \frac{R_D R_q}{R_D + R_q} \approx C_e R_D \quad \text{Éq. 2.12}$$

Le circuit a une constante de temps de recharge τ_r donnée par :

$$\tau_r = C_c R_q \quad \text{Éq. 2.13}$$

Les circuits passifs permettent d'obtenir un temps de recharge de 75 ns à quelques centaines de nanosecondes [77].

On remarque dans ce circuit que C_{ic} joue un rôle important dans le temps pris pour éteuffer un SPAD et nuit à la résolution temporelle du système.

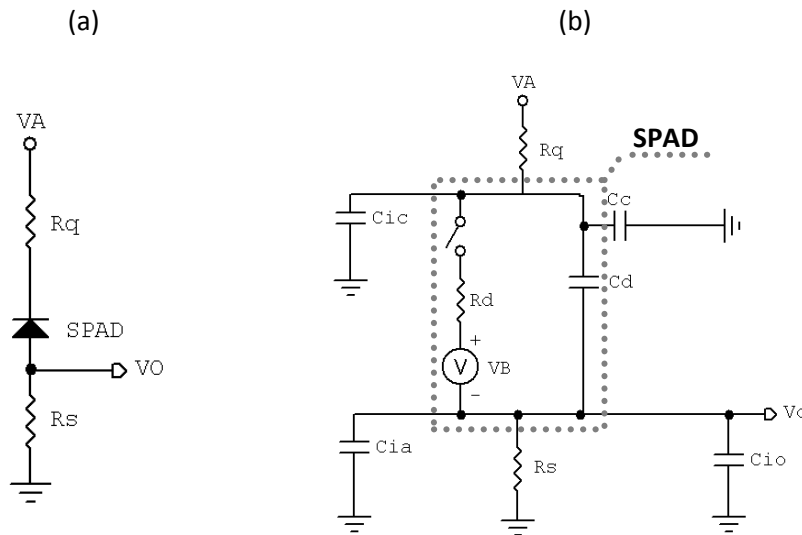


Figure 2.14 (a) Circuit d'éteuffement passif. (b) Circuit équivalent du SPAD.

Circuits d'éteuffement actifs

Tout comme dans les circuits passifs, les capacités d'interconnexion parasites des circuits actifs jouent un rôle important dans les constantes de temps de recharge. Ces capacités d'interconnexions

augmentent également le courant de claquage de la jonction et augmentent la probabilité d'*afterpulsing*.

Les circuits actifs détectent le front montant du courant d'avalanche par un bloc de détection de seuil qui contrôle le circuit d'alimentation du SPAD. Il existe plusieurs architectures de circuit et certaines ont des temps morts ajustables de 10 ns à 1 µs pour optimiser le compromis entre la PDP et l'*afterpulsing* [78, 89, 90]. En effet, le temps mort d'un circuit d'étouffement contribue à la détérioration de la PDP. Plus ce dernier est élevé, plus la PDP est faible, car la probabilité que des photons soient absorbés pendant le temps mort augmente. Aussi, le temps mort affecte également le taux de comptage maximal et affecte donc la plage d'opération du SPAD en termes de puissance optique (c.-à-d. photons par seconde). D'un autre côté, un temps mort élevé permet de donner le temps aux pièges de libérer leurs porteurs et d'éviter de fausses détections. L'augmentation du temps mort permet ainsi la diminution de la probabilité d'*afterpulsing*

2.4.9 Matrices de SPAD

Un SPAD à lui seul possède un taux de comptage maximum limitant le flux de photons détectables et limitant sa plage d'opération et ses performances. Pour augmenter le flux de photons détectables et améliorer leurs performances, les SPAD peuvent s'intégrer en matrices dans un détecteur. Ceci permet également de localiser la position de photons incidents si les SPAD d'une matrice se lisent individuellement. Pour s'assurer d'avoir le maximum de PDP, l'espace mort entre les SPAD est réduit pour augmenter le facteur de remplissage (F_R), qui se définit comme⁹ :

$$F_R = \frac{S_P}{S_T} \quad \text{Éq. 2.14}$$

où S_P est la surface photosensible du détecteur et S_T la surface totale du détecteur.

Deux types de matrices de SPAD sont présentés dans cette sous-section, les photomultiplicateurs sur silicium et les modules de comptage de photons.

⁹ Il est difficile de comparer le facteur de remplissage entre systèmes puisque certains auteurs le calculent en excluant l'électronique de lecture en périphérie. Dans cet ouvrage, F_R inclut toute la surface active de la puce incluant l'électronique de lecture.

Photomultiplicateur sur silicium

Contrairement à un SPAD individuel, un photomultiplicateur sur silicium (*Silicon photomultiplier*, ou SiPM)¹⁰ se compose d'une matrice à deux dimensions de SPAD étouffés individuellement avec une résistance de valeur élevée. Les sorties des SPAD sont sommées en parallèle générant un signal de sortie analogique proportionnel au nombre de diodes déclenchées, donc proportionnelles à la puissance optique incidente [91]. Cette règle a cependant deux limites. Premièrement, lorsque la puissance optique instantanée est suffisamment élevée, cette proportionnalité n'est plus valide puisque le SiPM se retrouve alors saturé, c'est-à-dire que tous les SPAD sont déclenchés simultanément. Il s'agit de la limite supérieure de la plage d'opération d'entrée du SiPM, s'exprimant en photons par seconde. Deuxièmement, cette règle de proportionnalité n'est pas parfaitement linéaire puisque la recharge des SPAD se fait passivement et peut durer ~ 100 ns. Lorsque des photons sont absorbés pendant cette recharge, la charge générée par le claquage de la jonction peut être moindre, ce qui induit une non-linéarité du signal de sortie.

Plusieurs topologies de circuits d'étouffement passifs peuvent être utilisées. Par exemple, la figure 2.15 montre une topologie classique où chaque SPAD est étouffé individuellement par une résistance R_L et où le signal de sortie est commun. La résistance R_s sert à faire une conversion *courant-tension* pour la mesure du signal.

¹⁰ Parfois appelé également *Multi-Pixel Photon Counter* (MPPC)

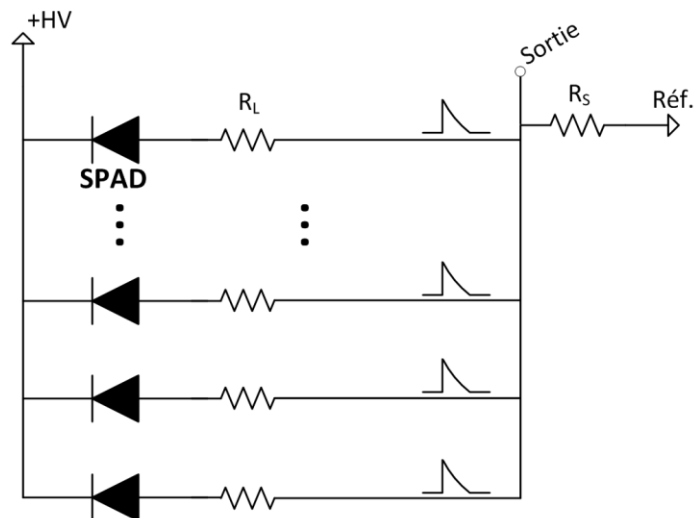


Figure 2.15 Exemple de SiPM où les SPAD sont étouffés individuellement avec une résistance R_L et le signal de sortie consiste en la somme analogique des signaux provenant des SPAD.

Photomultiplicateur sur silicium numérique

La figure 2.16 montre un exemple d'intégration où les circuits d'étouffement sont actifs. Les sorties numériques des circuits d'étouffement sont sommées ici pour fournir un signal analogique en courant à la sortie du détecteur.

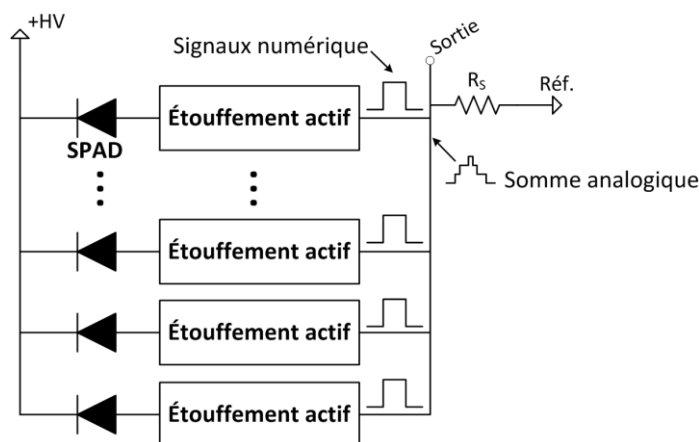


Figure 2.16 Exemple d'une matrice de SPAD étouffé activement où la somme analogique des courants de sorties des circuits d'étouffement génère le signal de sortie.

Quoique leur développement soit beaucoup plus complexe que les SiPM, ces matrices offrent plusieurs avantages. L'étouffement actif permet d'ajuster le temps mort des SPAD pour optimiser la PDP en minimisant les effets néfastes de l'*afterpulsing*. La conception de circuits actifs permet l'ajout de fonctionnalités dédiées à des applications spécifiques. Un circuit de lecture intelligent pourrait par

exemple désactiver des SPAD bruyants. L'étouffement rapide des circuits actifs permet également d'optimiser les performances en temps. Par contre, les circuits d'étouffement actifs ont une plus grande superficie que les circuits passifs et le facteur de remplissage de ces matrices est ainsi réduit. Pour cette raison, l'intégration 3D offre une excellente avenue pour cette problématique.

2.4.10 Comparaison d'un SPAD et d'une photodiode linéaire

Quoique leur structure soit similaire, il existe plusieurs différences fondamentales entre les SPAD, opérés en mode *Geiger*, et les photodiodes opérées dans un régime linéaire.

Tout d'abord, puisque leur champ électrique est très élevé, les SPAD offrent de meilleures résolutions temporelles que les diodes opérées en mode linéaire. Ils ont également une plus grande sensibilité¹¹.

Le courant d'obscurité des diodes opérées en mode linéaire inclut la contribution du courant de surface. Le paramètre comparable pour les SPAD est le DCR, qui lui n'inclut pas le courant de surface puisque celui-ci ne passe pas par la région de multiplication du dispositif dans les deux cas.

Par contre, les SPAD possèdent un taux de comptage maximum fixé par le temps d'étouffement, le temps mort et le temps de recharge de la jonction. Ce taux de comptage maximum limite le flux de photons détectables, limitant donc la plage d'opération du SPAD. Pour les photodiodes opérées en mode linéaire, le flux de photons maximal détectables dépend de la plage dynamique du circuit de lecture et peut-être beaucoup plus élevé que pour les SPAD¹². Pour contrer ce problème, les SPAD peuvent s'intégrer en matrice pour détecter un plus grand flux de photons. Il est par contre beaucoup plus complexe de concevoir des matrices SPAD puisque ces dernières peuvent présenter de la diaphonie, détériorant les performances du détecteur.

Le tableau 2.1 présente en résumé les performances de différents détecteurs commerciaux.

¹¹ En d'autres mots, la sensibilité est la limite inférieure de la plage d'opération du détecteur.

¹² La limite supérieure du flux détectable est aussi la limite où le SPAD commence à se détériorer mécaniquement due à l'énergie du signal optique.

Tableau 2.1 Résumé des performances de photodétecteurs commerciaux.

Type	Tension d'opération (V)	Rendement quantique (%)	Courant d'obscurité ($\text{fA } \mu\text{m}^{-2}$) ¹³	Taux de comptage en obscurité ($\text{s}^{-1}\mu\text{m}^{-2}$) ¹⁴	Résolution temporelle (ps LMH) ¹⁵	Gain
PMT	1k-2k	20-30	0,013 [92]	-	~200	$1-10 \times 10^6$
PIN	40-200	50-80	0,076 [93]	-	-	1
PDA	100-500	60-80	100	-	1-5 ns	50-200
SiPM	30-70 ¹⁶	20-50	-	0,05 [94]	500	$1-10 \times 10^6$
SPAD	20-200 ¹⁶	35-65	-	0,05	50-200	-

2.4.11 SPAD développés en technologie CMOS

On retrouve une panoplie de SPAD fabriqués en technologie CMOS dans la littérature. Le CMOS offre l'avantage d'un coût faible et permet également l'intégration monolithique de circuits d'étouffement [52]. Par contre, les procédés de microfabrication ne sont pas tous optimisés pour la photodétection et les procédés incluent généralement des diélectriques inter-métaux limitant la transmission de la lumière.

Il existe principalement deux structures de SPAD de technologies CMOS dans la littérature, des jonctions $p+n$ et $n+p$. Puisque $\alpha_n/\alpha_p > 1$, le maximum de PDP des jonctions $p+n$ se situe autour de 450 nm et celui des diodes $n+p$ autour de 550 nm [72].

La PDP de matrices de SPAD fabriquées en CMOS varie de 0,1 à 50 %¹⁷ [56]. Les matrices de SPAD souffrent de faible facteur de remplissage qui dépasse rarement 1% pour des systèmes intégrant les circuits d'étouffement en deux dimensions [95]. Certains auteurs présentent un facteur de remplissage de 50 %, mais ces derniers excluent généralement l'électronique de lecture en périphérie [57].

¹³ Le courant d'obscurité est normalisé par rapport à la surface active des photodétecteurs. Pour les composants linéaires (PIN, PDA et PMT), il est exprimé en $\text{fA } \mu\text{m}^{-2}$.

¹⁴ Le taux de comptage en obscurité est normalisé par rapport à la surface active des photodétecteurs. Pour les composants à déclenchement (SiPM et SPAD) ce dernier est exprimé en nombre d'évènements par unité de temps, c'est-à-dire en $\text{s}^{-1}\mu\text{m}^{-2}$.

¹⁵ La résolution temporelle, exprimée en picoseconde à la largeur à mi-hauteur (LMH), représente la variation statistique possible d'une mesure en temps.

¹⁶ Dans ce cas, on parle ici de probabilité de photodétection (PDP).

¹⁷ Ces valeurs incluent l'effet du facteur de remplissage F_R .

La figure 2.17(a) présente une synthèse de la corrélation du DCR normalisé avec l'aire de la surface photosensible des SPAD pour différentes technologies. Il ne semble pas évident qu'il existe une corrélation du DCR en fonction de la technologie CMOS utilisée. Néanmoins, la majorité des SPAD en technologie 0,35 μm possède un DCR autour de $10 \text{ s}^{-1}\mu\text{m}^{-2}$ tandis que pour les SPAD de technologie 0,8 μm , le DCR se trouve plutôt sous la barre des $10 \text{ s}^{-1}\mu\text{m}^{-2}$. Les SPAD en technologie de 0,18 μm ont plutôt un DCR autour de $100 \text{ s}^{-1}\mu\text{m}^{-2}$. Cette valeur plus élevée peut s'expliquer par les recuits thermiques généralement rapides pour ces technologies laissant plus de défauts dans la structure cristalline des composants [96].

Un champ électrique plus élevé à la jonction d'un SPAD diminue le temps de dérive des porteurs et améliore la résolution temporelle. Cette dépendance à la tension de polarisation rend difficile la comparaison de la résolution temporelle entre les différentes technologies. Néanmoins, la figure 2.17(b) montre qu'il est possible d'atteindre des résolutions temporelles inférieures à 100 ps LMH avec la plupart des technologies de 0,09 à 0,8 μm en optimisant les tensions d'opération et la surface des SPAD.

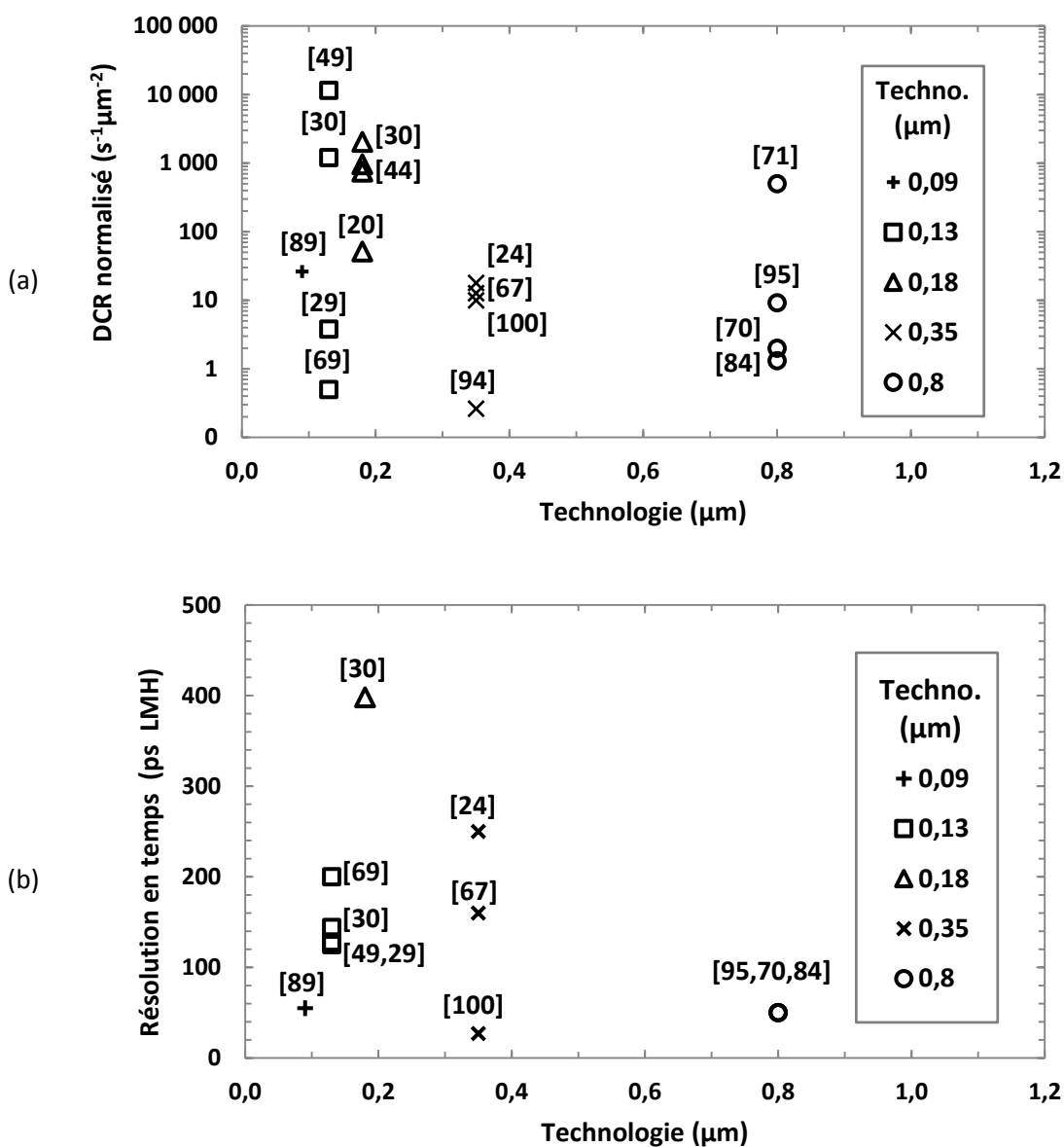


Figure 2.17 (a) Taux de comptage en obscurité (DCR) normalisé et (b) résolution temporelle de SPAD en différentes technologies CMOS¹⁸.

2.4.12 SPAD en procédé dédié à l'optoélectronique

Le développement de SPAD en procédé optoélectronique permet d'obtenir d'excellentes performances en termes de DCR et d'*afterpulsing* puisque la qualité du substrat cristallin est généralement bien contrôlée. En effet, ce type de procédés de fabrication en optoélectronique utilise des recuits

¹⁸ Les SPAD de cette figure ont tous été caractérisés à température ambiante.

thermiques optimisés pour minimiser la densité de défauts dans la structure cristalline entre autres engendrés par l'implantation ionique des jonctions, ce qui n'est pas nécessairement le cas pour les technologies CMOS submicroniques.

De plus, contrairement au CMOS, les procédés dédiés à l'optoélectronique permettent souvent d'utiliser un revêtement antiréfléchissant pour améliorer la probabilité de détection des photons.

Finalement, le dopage des jonctions pn est adapté afin de minimiser les défauts, d'optimiser la profondeur de jonction selon les longueurs d'onde de détection visées et d'ajuster les tensions d'opération permettant d'améliorer la probabilité de détection. Certaines technologies laissent même le choix au concepteur de la concentration de dopage désirée. Ceci ajoute de la flexibilité que le CMOS ne permet pas, mais se traduit par un coût élevé de développement et de production. De plus, les procédés dédiés ne permettent généralement pas l'intégration monolithique de circuits comparativement au CMOS.

2.4.13 Conclusion

Comme il a été mentionné dans ce chapitre, les SPAD sont des dispositifs complexes dont les paramètres physiques influencent leurs performances. La conception et le point d'opération des SPAD doivent être soigneusement choisis pour optimiser les performances pour une application donnée. Le tableau 2.2 résume les conséquences des principaux paramètres sur les performances des dispositifs.

D'abord, un premier compromis doit être fait sur la tension de polarisation (V_E). Plus celle-ci est élevée plus le DCR augmente (la génération thermique et l'*afterpulsing*). Cependant, une valeur élevée de V_E augmente la résolution temporelle et la PDP. Ensuite, la température joue un rôle crucial pour les SPAD et celle-ci doit être nécessairement contrôlée lors de l'utilisation des SPAD pour éviter toute dérive. Plus la température est élevée, plus la concentration de porteurs générés thermiquement augmente. Par contre, une température élevée du dispositif diminue le temps de vie des porteurs dans la diode et diminue l'*afterpulsing*. Également, l'ionisation par impact est moins efficace à température élevée et la tension de claquage augmente.

Finalement, la diminution de la surface active des SPAD a un impact positif sur la résolution temporelle, sur le DCR ainsi que sur l'*afterpulsing*. Cependant, plus la surface active est diminuée, plus le facteur de remplissage sera également diminué puisque l'isolation entre les SPAD ainsi que les anneaux de

garde occuperont une plus grande part de la surface active totale. Ceci entraîne une diminution de la probabilité de détection d'une matrice.

Tableau 2.2 Résumé de l'effet des paramètres physiques sur les performances des SPAD où les effets annotés de (+) ont un impact positif sur les performances, les effets annotés de (-) ont un impact négatif sur les performances et les paramètres marqués d'un X ont aucun effet sur la performance indiquée.

Paramètres	Effets sur les performances ¹⁹			
	Probabilité de photodétection	Résolution temporelle	Génération thermique	<i>Afterpulsing</i>
Diminution de V_e	Diminution (-)	Diminution (-)	Diminution (+)	Diminution (+)
Diminution de V_{br}	Diminution (-)	Augmentation (+)	Augmentation (-)	Augmentation (-)
Diminution du temps mort	Augmentation (+)	X	X	Augmentation (-)
Diminution de la température	X	X	Diminution (+)	Augmentation (-)
Diminution de la surface active	Diminution (-) ²⁰	Augmentation (+)	Diminution (+)	Diminution (+)
Augmentation du facteur de remplissage	Augmentation (+)	X	X	X

¹⁹ Le signe (+) indique une amélioration des performances tandis que le signe (-) indique une détérioration des performances.

²⁰ La PDP diminue pour une diminution de la surface active pour un faisceau lumineux constant.

CHAPITRE 3. CONCEPTION

Ce chapitre présente le développement de SPAD qui s'est déroulé en 3 grandes étapes. Premièrement, différentes jonctions pn ont été simulées par éléments finis. Les résultats ont permis de déterminer des structures de SPAD optimales ainsi que des méthodes d'isolation des SPAD. Deuxièmement, une puce (premier prototype) a été conçue dans un but d'explorer la technologie CMOS haut voltage CMOSP8G de *Teledyne DALSA* et de faire une preuve de concept. Troisièmement, une série d'ASIC (deuxième prototype) a été conçue basée sur les résultats de simulation et les résultats de caractérisation du premier prototype. Ce deuxième prototype vise l'étude des SPAD dans le but d'en faire l'optimisation.

3.1 Simulations par éléments finis

Les simulations par éléments finis permettent de modéliser en 2D le comportement électrique des jonctions pn développées dans ce projet et permettent de justifier la conception du deuxième prototype. Pour des raisons d'opportunités, les simulations décrites dans cette section n'ont pu être réalisées qu'après la conception du premier prototype. On y décrit les simulations de SPAD à anneau de garde à diffusion et virtuel ainsi qu'une isolation des SPAD utilisant un puits p .

3.1.1 Méthodologie de simulation

Les jonctions pn sont modélisées avec le logiciel *Taurus Medici* et utilisent les profils de diffusion des différents niveaux de la technologie fournis par *Teledyne DALSA*. Le logiciel simule le champ électrique des SPAD, le potentiel électrostatique, l'ionisation par impact et la génération bande à bande. Les résultats de simulation permettent de valider le comportement de l'anneau de garde, d'évaluer la tension de claquage des structures et d'estimer les distances minimales entre les diffusions.

Avec un anneau de garde efficace, le maximum de champ électrique devrait se situer dans la région photosensible du SPAD. La simulation du champ électrique permet également de déterminer les distances minimales de séparation des SPAD menant à une densité d'intégration optimale. Le logiciel simule également la distribution du potentiel électrostatique et permet la validation du fonctionnement de l'isolation des SPAD par le puits p .

Les simulations prédisent la tension de claquage des SPAD. Cette dernière est déterminée lorsque le logiciel atteint une tension de polarisation où il ne peut converger dû à une forte densité de charge. La valeur de claquage ainsi trouvée n'est donc pas fiable. De plus, elle dépend de plusieurs paramètres, dont le profil de jonction et le maillage utilisé.

La région de multiplication des dispositifs est déterminée lorsque le champ électrique est supérieur à $3 \times 10^5 \text{ Vcm}^{-1}$. Ce champ électrique engendre un taux d'ionisation par impact suffisamment élevée pour créer une avalanche soutenue dans une jonction *pn* typique [75]. La région de multiplication permet la comparaison de la capacité de jonction et de l'efficacité quantique des différentes structures.

Le maillage des structures est critique pour obtenir une simulation réaliste du comportement de la jonction à tension élevée. Pour cette raison, pour chacune des structures un raffinement du maillage est fait à une tension près de la tension de claquage.

Le logiciel ne permet pas la simulation du fonctionnement des diodes lorsqu'elles sont opérées au-dessus de la tension de claquage puisque l'algorithme ne peut converger due à la grande densité de charge.

3.1.2 Structure de SPAD à puits profonds

Anneau de garde *p-tub*

Cette architecture de SPAD est la structure permettant le régime *Geiger* la plus utilisée dans les deux prototypes de ce projet. Ce SPAD utilise une diffusion *p-tub* comme anneau de garde. Le résultat de simulation de ce SPAD à la figure 3.1 (a) montre un maximum de champ électrique dans la région photosensible du SPAD. Cette jonction a une tension de claquage en simulations de 21 V.

La figure 3.1 (b) montre un maximum de champ électrique de la région photosensible à $5,2 \times 10^5 \text{ Vcm}^{-1}$ situé à 600 nm de profondeur. La largeur de la région de multiplication fait 500 nm. Le maximum de champ électrique de l'anneau de garde est $2,5 \times 10^5 \text{ Vcm}^{-1}$.

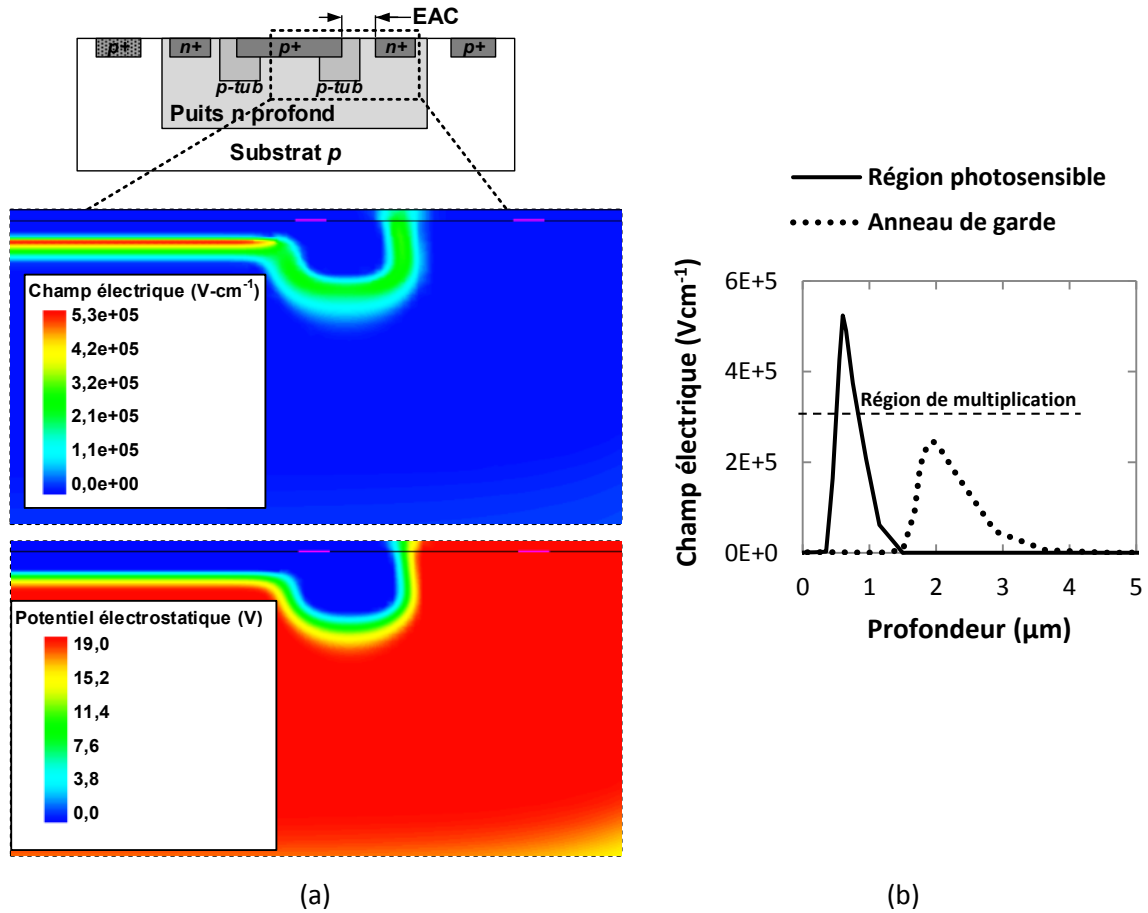


Figure 3.1(a) Vue en coupe d'un SPAD à anneau de garde par diffusion avec les résultats de simulation et (b) profil du champ électrique de la région de multiplication et de l'anneau de garde simulé.

Anneau de garde non fonctionnel

Le puits *p* est plus profond que le *p-tub*. Les SPAD à puits *n* profond utilisant un anneau de garde à puits *p* souffrent d'un appauvrissement complet du puits *n* sous l'anneau de garde. La figure 3.2 montre que ce phénomène induit une réduction indésirable du champ électrique appliqué dans la région photosensible, augmentant la tension de claquage. Le même problème s'observe dans le puits *n* peu profond et un anneau de garde *p-tub*.

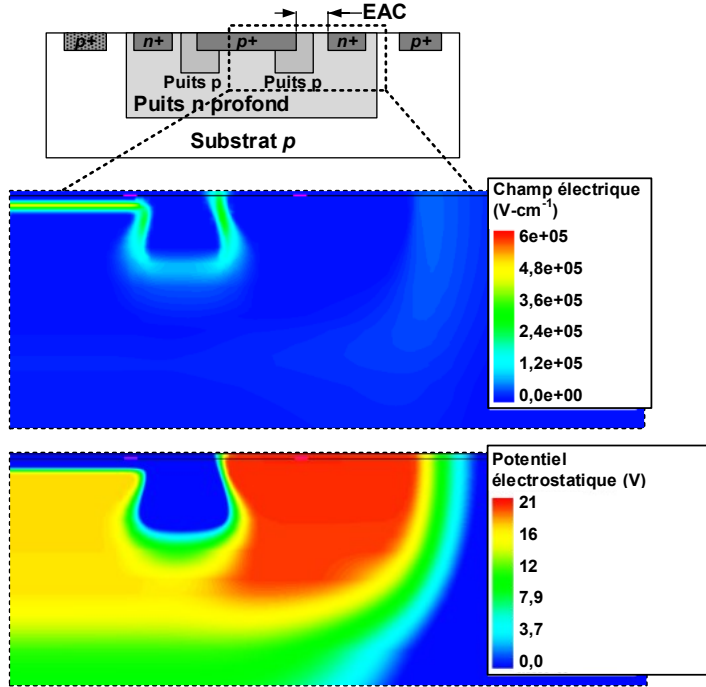


Figure 3.2 Vue en coupe d'un SPAD à anneau de garde par diffusion avec le résultat d'une simulation montrant une variation du potentiel électrostatique sous le puits p signifiant un appauvrissement complet du puits n .

3.1.3 Structure de SPAD à puits peu profonds

Anneau de garde virtuel

La simulation présentée à la figure 3.3 (a) est la seconde structure de SPAD développée et fonctionnelle du deuxième prototype. Elle utilise un anneau de garde virtuel dans un puits peu profond. L'appellation *SPAD à anneau de garde virtuel* dans ce manuscrit fait référence exclusivement à cette structure. Le résultat de simulation, figure 3.3 (b), montre un maximum de champ électrique dans la région photosensible de $5,9 \times 10^5 \text{ Vcm}^{-1}$ situé à 600 nm de profondeur. La largeur de la région de multiplication est 200 nm. Le maximum de champ électrique de l'anneau de garde est $1,8 \times 10^5 \text{ Vcm}^{-1}$. Le claquage de cette jonction se produit en simulation à 14 V.

Une légère augmentation du champ électrique s'observe à partir de 3 μm de profondeur et provient de la jonction du puits n peu profond avec le substrat p .

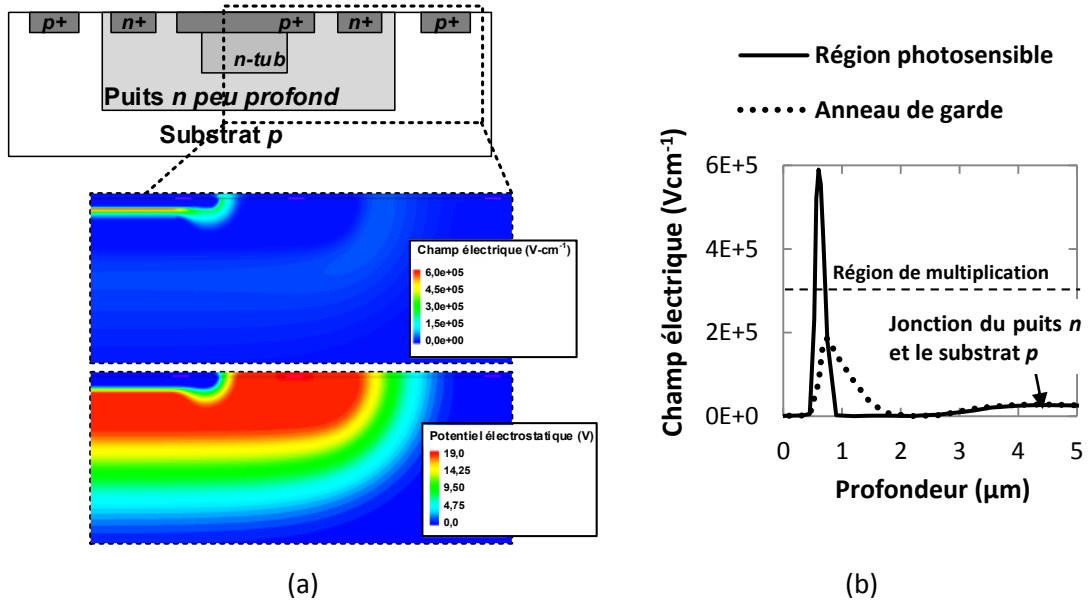


Figure 3.3 (a) Vue en coupe d'un SPAD à anneau de garde virtuel avec les résultats d'une simulation et (b) profil du champ électrique de la région de multiplication et de l'anneau de garde simulé.

Anneau de garde non fonctionnel

La simulation présentée à la figure 3.4 montre un SPAD sans anneau de garde conçu dans le premier prototype avec un maximum de champ électrique de $5,1 \times 10^5 \text{ Vcm}^{-1}$ situé dans la région latérale du SPAD. Pour qu'une avalanche soutenue se déclenche par des photons, un SPAD doit avoir un maximum de champ électrique dans la région photosensible. Le SPAD présenté dans cette sous-section est donc non fonctionnel.

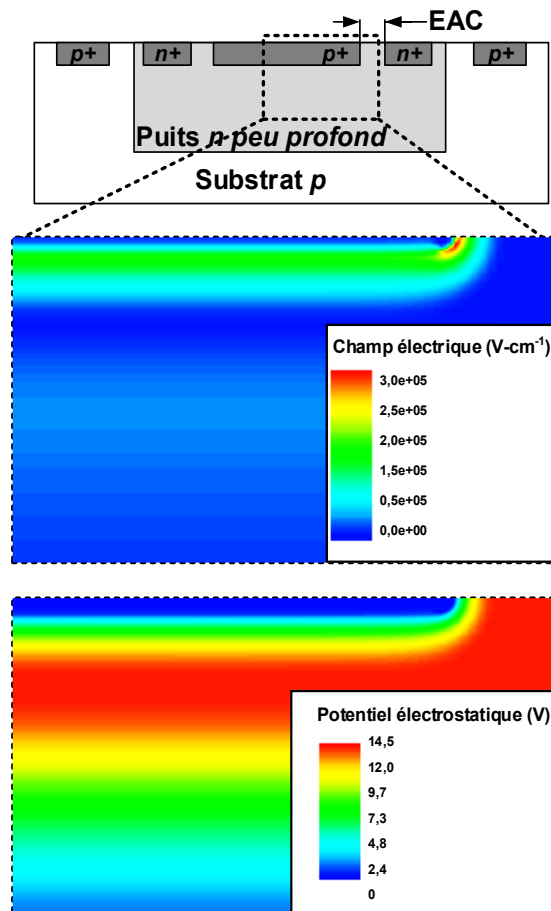


Figure 3.4 Vue en coupe d'un SPAD sans anneau de garde montrant un champ électrique élevé en périphérie du SPAD confirmant un claquage latéral indésirable.

3.1.4 Simulation de l'isolation à puits p

La figure 3.5 présente le potentiel électrostatique d'une simulation montrant le comportement de l'isolation des SPAD par le puits p . La figure montre un potentiel moins élevé sous le puits p , isolant ainsi électriquement les deux SPAD.

Le même phénomène expliquant l'anneau de garde dysfonctionnel de la section 3.1.2 est utilisé, mais cette fois pour concevoir une isolation électrique des SPAD. Le gradient de potentiel sous le puits p indique qu'un champ électrique est présent empêchant les trous de diffuser d'un SPAD à l'autre et déclencher des claquages de jonctions indésirables.

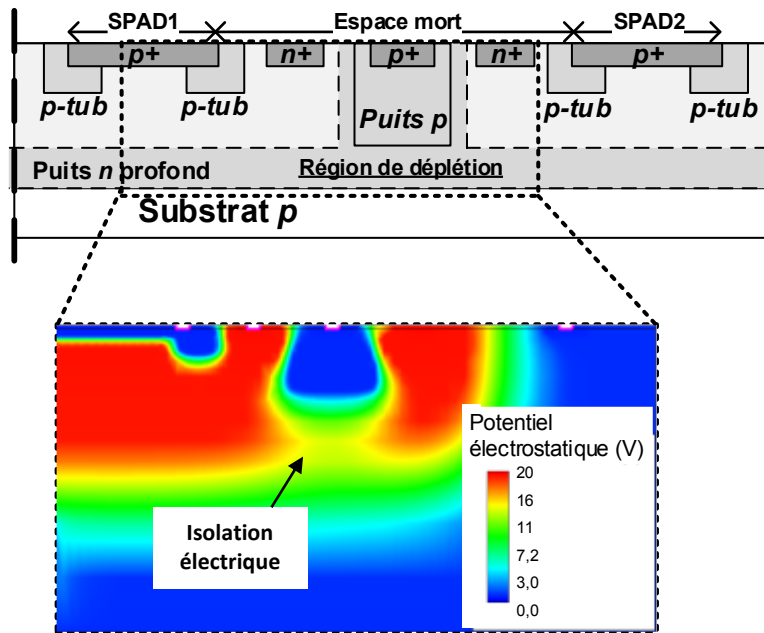


Figure 3.5 Vue en coupe de deux SPAD à anneau de garde à diffusion avec une isolation à puits p montrant une variation du potentiel électrostatique sous le puits p signifiant un appauvrissement complet du puits n et une isolation électrique des SPAD²¹.

3.2 Premier prototype

Les simulations présentées à la section 3.1 n'ont pu être réalisées qu'après la conception du premier prototype. La conception a donc été basée principalement sur des intuitions. Les structures servent principalement à explorer les possibilités de la technologie et ont comme objectifs de faire une preuve de concept de SPAD.

Ce premier prototype, représenté à la figure 3.6, se base sur une puce contenant 22 jonctions pn , destinées à être opérées en mode *Geiger*. Le diamètre des SPAD varie entre 35 et 100 μm ainsi que le nombre de côtés (6 et 32 côtés). La puce contient 2 plots d'interconnexion au substrat et l'anode et la cathode de chaque SPAD sont connectées à des plots individuels pour un total de 46 plots, nommés de (1) à (46).

²¹ La simulation montre un SPAD du côté droit du puits p et aucune SPAD du côté gauche ce qui permet de faciliter la simulation.

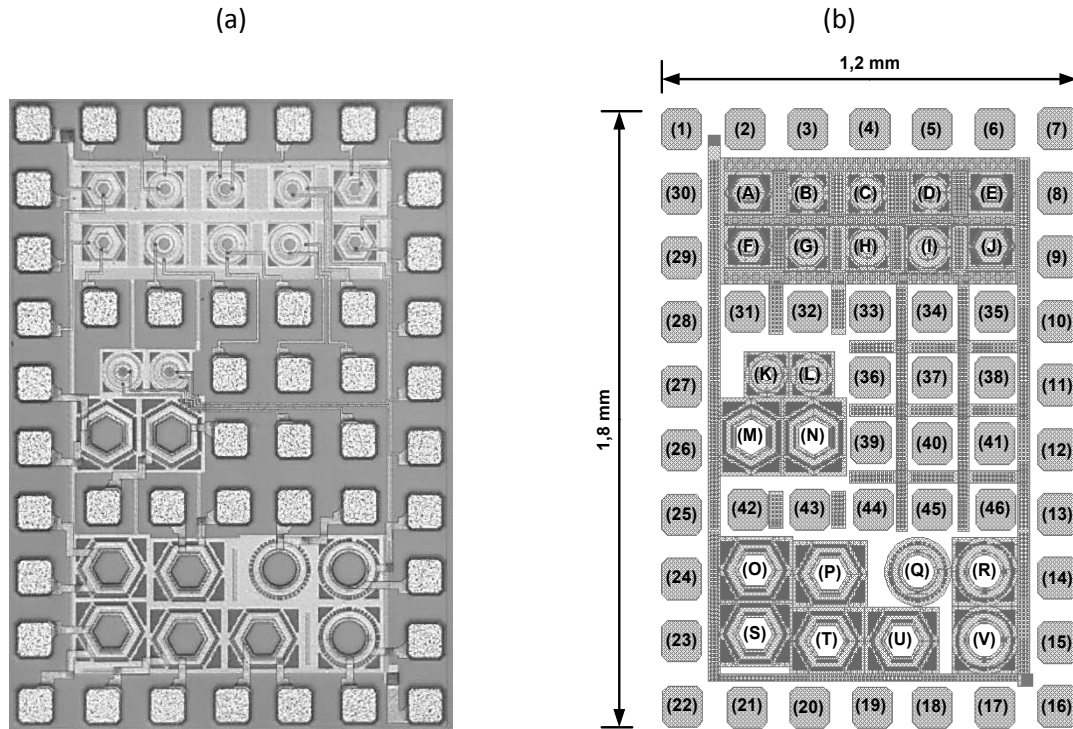


Figure 3.6 Illustrations du premier prototype montrant (a) une photographie et (b) le schéma de masque et la numérotation des puces et des plots d'interconnexion.

3.2.1 Structure des SPAD

La structure développée dans cette puce est une structure $p+n$ utilisant une diffusion p ($p\text{-diff}$) comme anneau de garde (figure 3.7). La conception des SPAD est contrainte à la disponibilité des couches. Heureusement, cette technologie CMOS contient plusieurs niveaux d'implantation permettant plusieurs variations de SPAD.

Plusieurs paramètres sont variés dans la structure des SPAD. Premièrement le puits n et l'anneau de garde ($p\text{-diff}$). Deux puits n sont utilisés de différentes profondeurs et différents dopages, un puits n profond, et peu profond. Aussi, trois différentes diffusions sont utilisées pour concevoir l'anneau de garde à diffusion en variant la profondeur de jonction ainsi que le dopage. De plus, certaines jonctions ont été conçues sans anneau de garde. La liste des structures est détaillée à l'annexe A. Le niveau $p+$ n'est pas varié et est constant pour toutes les structures. Deux dimensions sont conçues, 35 et 100 μm de diamètre. Finalement, deux géométries sont conçues, circulaires (32 côtés) et hexagonales.

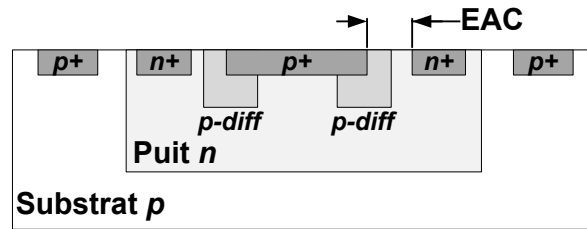


Figure 3.7 Vue en coupe de la structure conçue dans le premier prototype.

3.2.2 Montage de caractérisation

Un circuit imprimé a été conçu pour tester la puce, figure 3.8 (a). La carte inclue deux sites sur lesquels la puce est collée et microsoudée. Les SPAD sont étouffés à l'aide de la résistance R_E externe à la puce et intégrée au circuit imprimé. Ce nœud servant à l'étouffement est commun à quatre SPAD. Le SPAD se sélectionne à l'aide des interrupteurs R/x . Chacun des sites possède 4 blocs de SPAD ayant chacun une sortie pour y brancher un oscilloscope et observer le signal de sortie, figure 3.8 (b).

Un élément *Peltier* se monte en sandwich entre la face arrière du circuit imprimé et un dissipateur thermique. Ce montage permet un contrôle de la température à l'aide d'une thermistance soudée près de la puce. Un pad thermique sur la face arrière relie le site de collage de la puce et la thermistance par de multiple via pour obtenir un bon contact thermique.

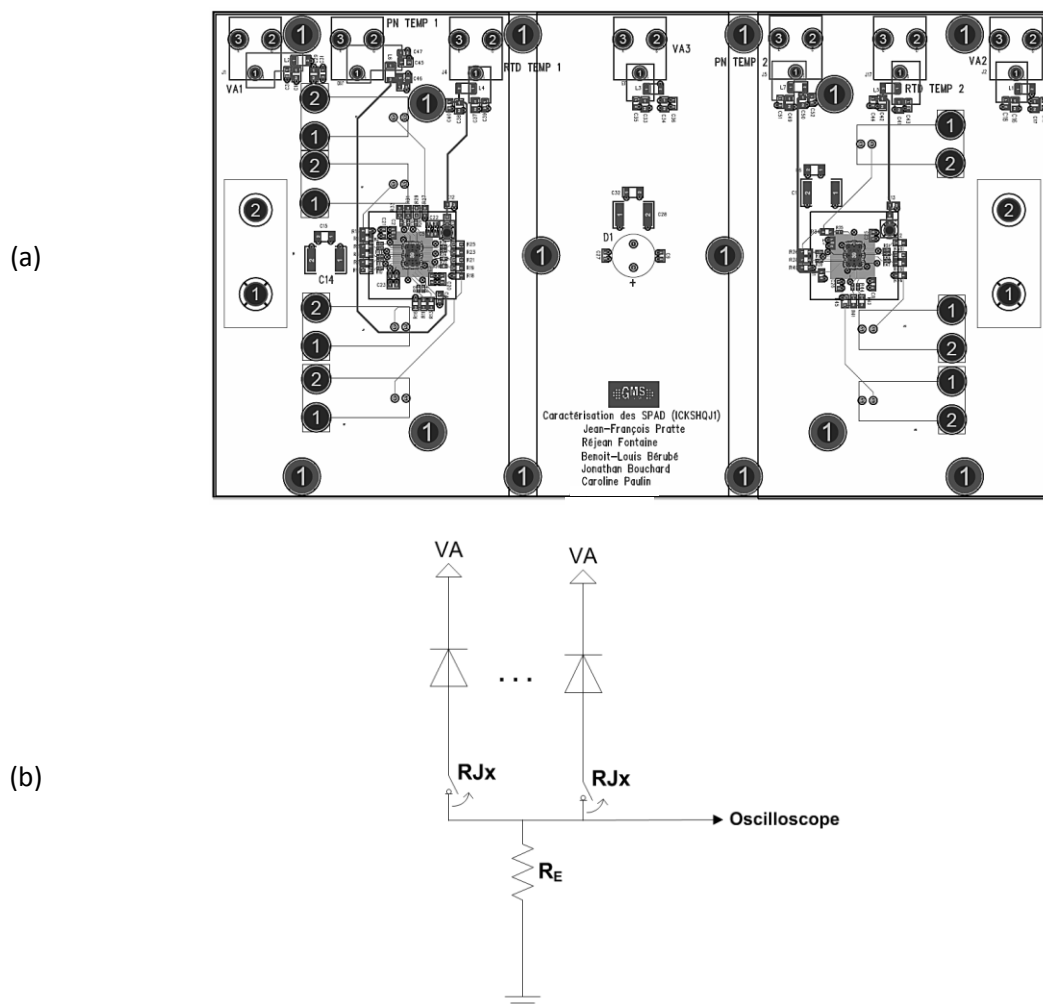


Figure 3.8(a) Schéma de masque du circuit imprimé et (b) schémas montrant l'interconnexion de deux SPAD avec le circuit d'étouffement intégré au circuit imprimé.

Un signal de sortie typique est présenté à la figure 3.9 et présente un temps de recharge de plusieurs microsecondes induit par la grande capacité parasite au nœud de la résistance d'étouffement R_E externe. L'amplitude du signal correspond à la tension excédentaire appliquée sur le SPAD.

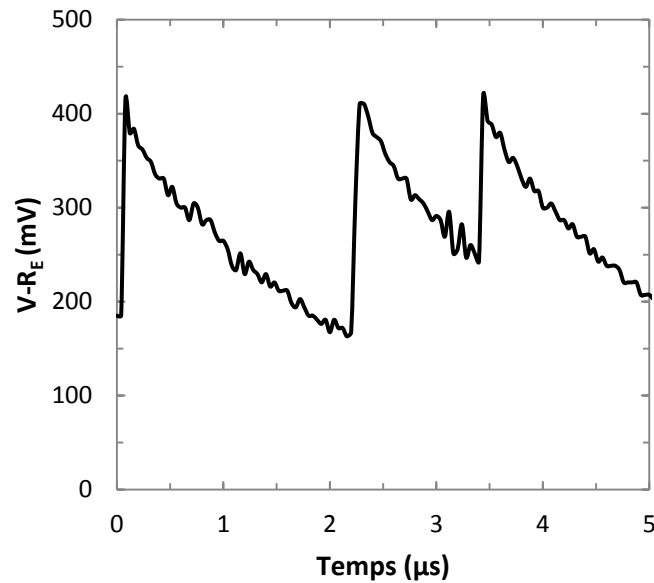


Figure 3.9 Signal de sortie typique du premier prototype présentant un long temps de recharge.

3.3 Deuxième prototype

Le deuxième prototype conçu est basé sur les résultats de simulations (section 3.1) et les résultats de caractérisation du premier prototype (section 3.2).

La figure 3.10 montre une photographie et les schémas de masques de l'ASIC et ses différentes parties. La puce A contient 6 matrices de 22×22 SPAD avec un pas de $50 \mu m$ dédiées à l'intégration 3D avec un étouffement actif des SPAD. La puce B contient 14 matrices de 2×3 SPAD permettant d'implanter plusieurs structures de test. La puce C contient une matrice de circuit d'étouffement dédiée à l'intégration 3D avec une des matrices de SPAD de la puce A. Le contenu de la puce C n'est pas détaillé dans cet ouvrage. La puce D contient 2 matrices de 3×3 SPAD pour des études de diaphonie. La puce E, contient des SPAD sans électronique destinée à la caractérisation des jonctions en mode linéaire. Finalement, les puces F1 et F2 contiennent différentes structures de test pour la caractérisation des TSV servant à l'intégration 3D.

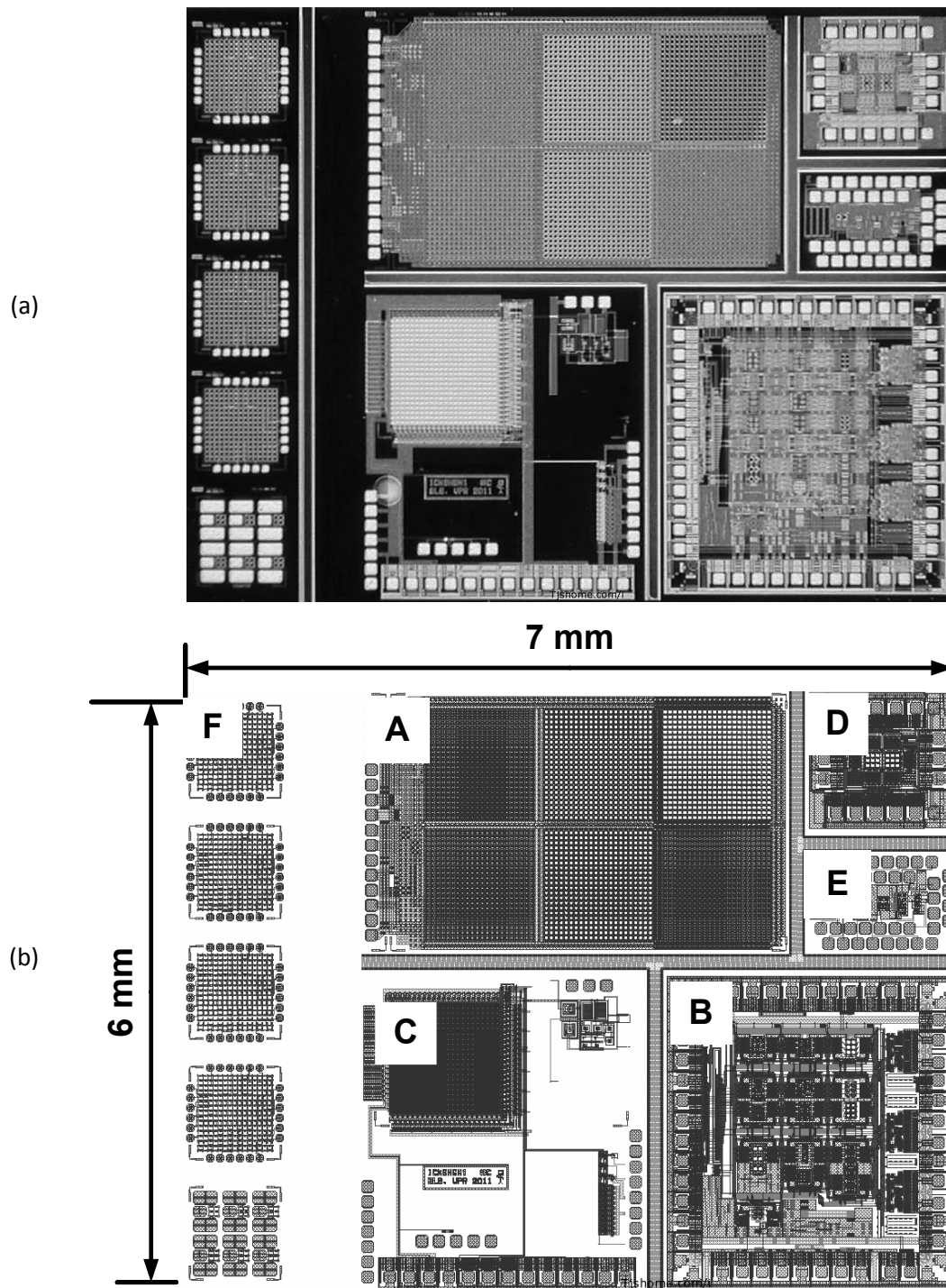


Figure 3.10 Illustration du deuxième prototype montrant (a) une photographie de la puce et (b) les schémas de masque avec la numérotation des puces.

17 et 19 V). Une tension de claquage aussi faible implique possiblement une capacité de jonction plus élevée et une région de déplétion moins volumineuse, et donc plus grande probabilité d'*afterpulsing*, des performances en temps et de PDP dégradée, ainsi qu'un DCR élevé due à la génération bande à bande. Une tension de claquage faible peut aussi indiquer le mal fonctionnement de l'anneau de garde et que le claquage est latéral détériorant le DCR et la PDP.

Distribution des contacts

Afin d'améliorer la densité d'intégration, certains SPAD utilisent une distribution asymétrique des contacts à l'anode et/ou à la cathode (figure 3.12). À l'opposé, une distribution symétrique possède des contacts à l'anode et la cathode distribués uniformément.

L'absence de contacts à l'anode sur un ou plusieurs côté(s) du SPAD permet d'éviter d'utiliser du métal au-dessus du $p+$, région photosensible du SPAD, augmentant ainsi la surface exposée aux photons. L'absence de contact à la cathode sur un ou plusieurs côté(s) permet de réduire l'espacement entre le $p+$ et le substrat p , qui devient seulement EAC+ENS, améliorant le facteur de remplissage F_R .

Un danger à distribuer les contacts de façon non uniforme est l'augmentation de la densité de courant local lors du déclenchement du SPAD. Il pourrait alors y avoir un accroissement de la température localisé à des endroits spécifiques à chaque évènement. Cet accroissement local de température peut augmenter la génération de porteurs thermiques.

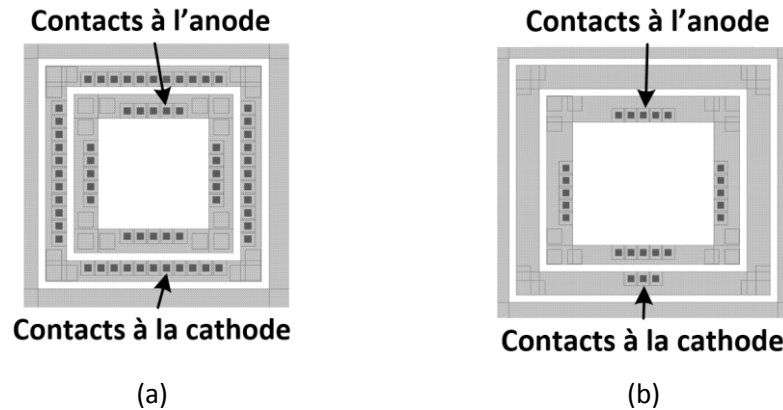


Figure 3.12 Schémas de masque d'un SPAD montrant (a) une distribution symétrique des contacts à l'anode et la cathode et (b) une distribution asymétrique des contacts à la cathode.

Isolation

Trois différentes méthodes sont utilisées pour isoler les SPAD et sont présentées à la figure 3.13. La première méthode d'isolation montrée à la figure 3.13 (a) consiste à concevoir les SPAD dans des puits n séparés. Cette méthode souffre d'une distance minimale élevée à respecter entre deux puits. Cet espacement important est dû à la constante de diffusion importante du puits n et son faible dopage faisant en sorte que la zone de déplétion avec le substrat est vaste. En revanche, en respectant les règles de dessin de la technologie, cette méthode assure une isolation électrique complète. De plus, la distance importante réduit considérablement la probabilité de diaphonie optique. Par contre, les règles de dessin originales ne sont parfois pas respectées afin de réduire l'espace mort entre les SPAD.

La figure 3.13 (b) montre une isolation de SPAD utilisant un puits p , polarisé au même potentiel que le substrat, c'est-à-dire à la tension de référence. Puisque le puits n de chaque SPAD se polarise à la haute tension, la jonction du puits p avec le puits n se retrouve fortement polarisée en inverse. Cette jonction appauvrit fortement, voire complètement, le puits n de porteur. Si le puits n s'appauvrit complètement de porteur sous le puits p , les SPAD se retrouvent ainsi isolés électriquement. L'espace mort minimal engendré par le puits p est près de 8 fois inférieures en respectant les règles de dessin comparativement à l'isolation à puits n . Les résultats de simulations en modèle à éléments finis présentés à la section 3.1.4 confirment ce comportement.

La figure 3.13 (c) présente la troisième méthode n'utilisant aucun mécanisme d'isolation. Cette méthode permet une densité d'intégration accrue comparée à ses homologues et a pour but d'évaluer

le comportement de la diaphonie électrique et de caractériser son impact sur le fonctionnement des SPAD. Cette structure permettra de justifier ou non l'utilisation d'un système d'isolation.

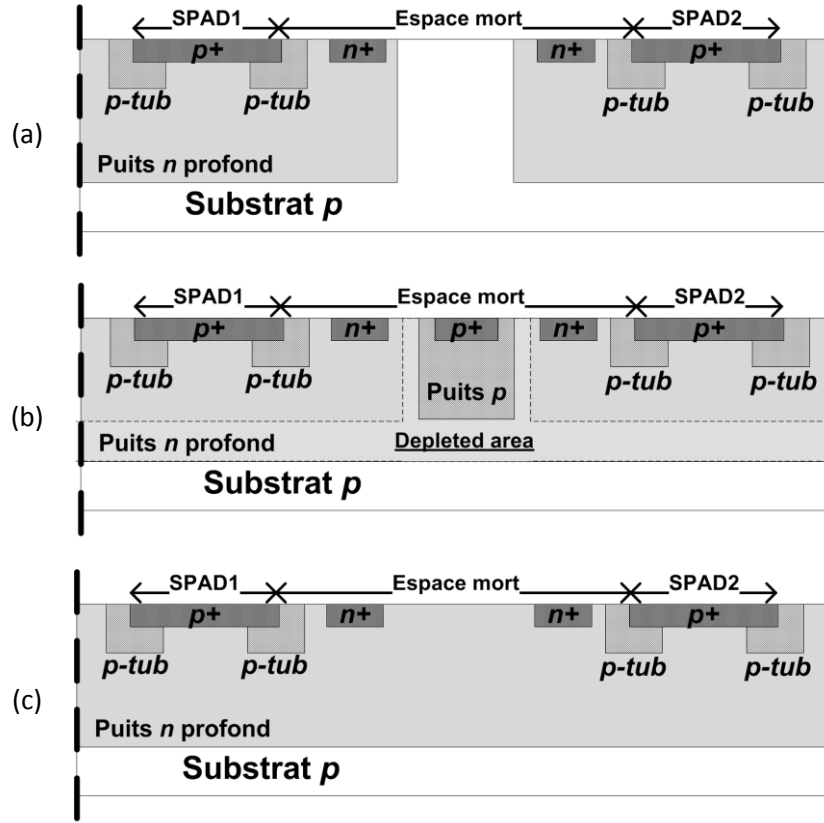


Figure 3.13 Isolation des SPAD utilisant (a) puits n , (b) puits p et (c) aucune isolation.

Structure typique

Pour alléger le texte, ce manuscrit fait référence à un SPAD typique dans le deuxième prototype. Cette structure typique est un SPAD de $14\ \mu\text{m}$ de diamètre, utilisant un anneau de garde à diffusion, une isolation à puits n , un facteur de remplissage en matrice de 11,7 %, une distribution des contacts asymétrique et dont $EAC = 2\ \mu\text{m}$ et $ENS = 2\ \mu\text{m}$.

3.3.2 Matrices de SPAD destinées à l'intégration 3D (Puce A)

La Puce A du deuxième prototype a comme objectif l'intégration 3D entre une matrice de SPAD et une matrice de circuits d'étouffement. Pour ce faire, la puce A montrée à la figure 3.14 (a) contient 6 matrices de 22×22 SPAD avec diverses topologies, détaillées à l'annexe B. Le facteur de remplissage

dépend de l'isolation utilisée et varie de 8 % pour une isolation à puits n à 54 % pour une isolation à puits p .

Les SPAD d'une matrice ont une cathode commune sur lequel est interconnecté le haut volage (HV1 à HV6). Chaque SPAD a un site dédié à la fabrication du TSV, comme il est montré à la figure 3.14. Le site du TSV se compose d'un anneau de métal à l'intérieur duquel le TSV est fabriqué. Le TSV fait 8 μm de diamètre et la distance centre à centre entre chaque SPAD sur toute la puce fait 50 μm .

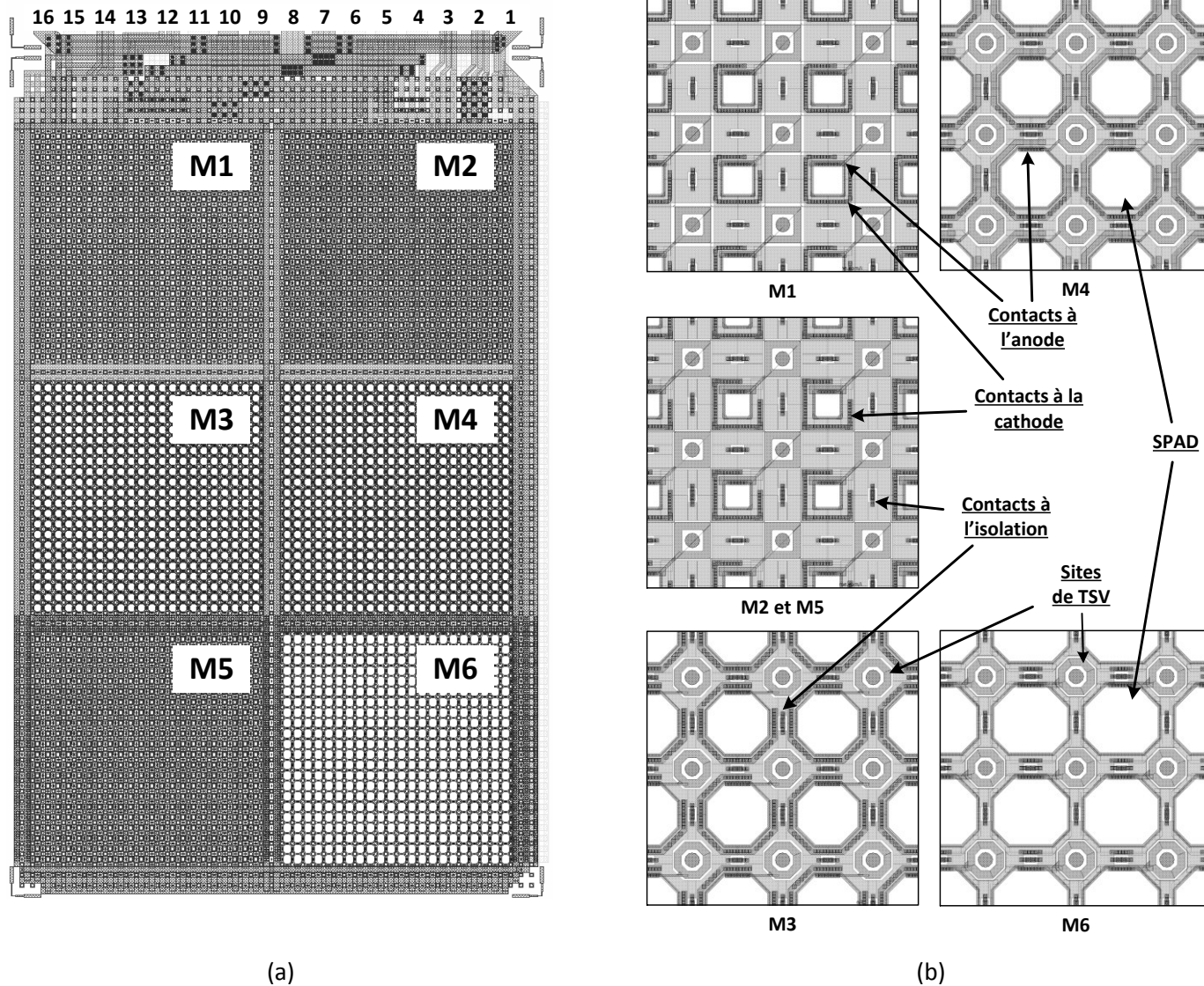


Figure 3.14 (a) Schéma de masques de la puce A du deuxième prototype contenant 6 matrices (M1 à M6) de 22×22 SPAD, où l'anode de chacun des 2904 SPAD est interconnectée à un site de TSV et (b) figure montrant les 5 différentes structures de SPAD ainsi que les sites de TSV.

3.3.3 SPAD avec circuits d'étouffement actifs (Puce B)

La puce B a comme objectif principal l'optimisation du SPAD fonctionnel développé dans le premier prototype. Pour ce faire, la puce intègre 15 matrices 2×3 (M1 à M15) totalisant 88 SPAD²² (figure 3.15). L'optimisation de la structure se fera premièrement en étudiant les sources de DCR afin de le réduire. Deuxièmement, l'étude du DCR, l'*afterpulsing*, la PDP, la diaphonie et la résolution temporelle en fonction de la température, du temps mort et de la tension de polarisation permettra de déterminer le point d'opération optimal des SPAD. Troisièmement, l'étude de l'isolation des SPAD afin d'intégrer ces derniers en matrices permettra de déterminer le meilleur compromis entre le facteur de remplissage, la PDP et la probabilité de diaphonie.

La puce a également comme objectif secondaire l'évaluation du SPAD à anneau de garde virtuel en en comparaison du SPAD à anneau de garde à diffusion. Cette section présente les structures de tests de SPAD contenues dans cette puce. La liste exhaustive des structures est détaillée à l'annexe C.

Électronique d'étouffement

Chaque SPAD s'étouffe avec un circuit actif incluant un temps mort ajustable de 25 ns à $>1 \mu\text{s}$ ainsi qu'un temps de recharge ajustable. La tension de seuil des circuits d'étouffement actif, c'est-à-dire la tension à laquelle ce dernier commence l'étouffement des avalanches soutenues, est de 1,4 V [97].

Un registre à décalage intégré à la puce permet de choisir quels SPAD se connectent sur l'une des 3 sorties de la puce. La figure 3.16 montre 3 déclenchements de SPAD sur une sortie, représentés par des impulsions négatives de $\sim 100 \text{ mV}$ et un niveau de référence de $\sim 1 \text{ V}$.

²² Une des 15 matrices contient 2×2 SPAD.

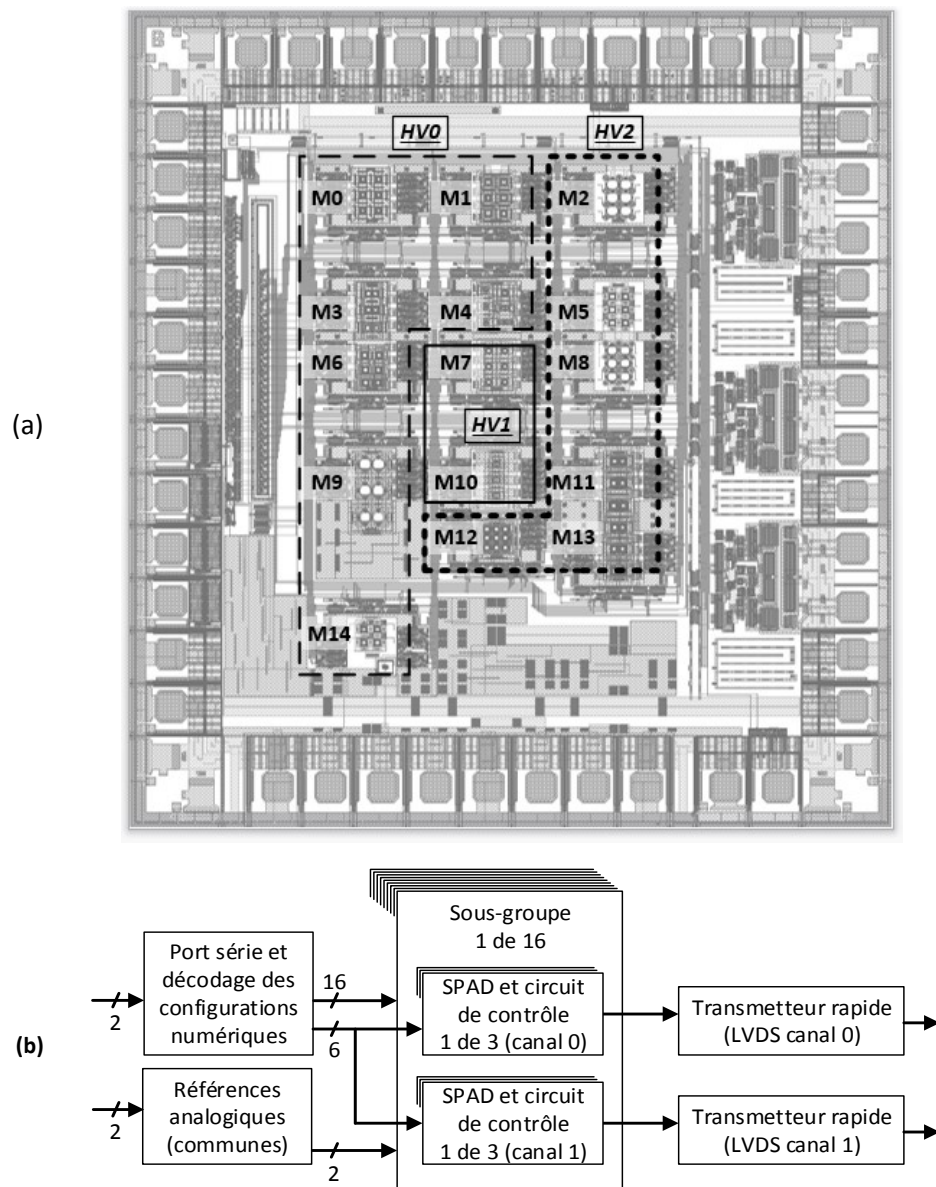


Figure 3.15 (a) Schéma de masques de la puce B du deuxième prototype contenant 15 matrices (M1 à M15), totalisant 88 SPAD avec circuits d'étouffement avec la numérotation et mettant en évidence les trois nœuds de haute tension avec (b) le schéma bloc de l'électronique de lecture (image tirée de [97]).

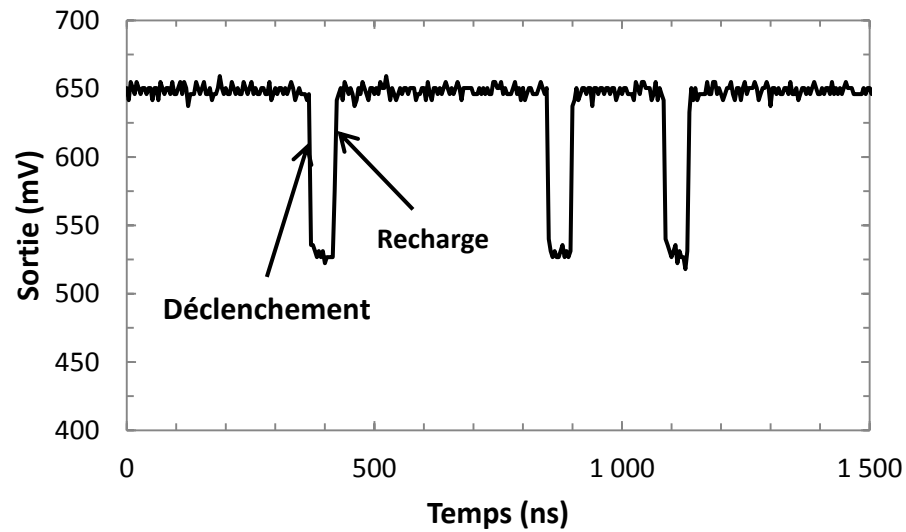


Figure 3.16 Signal de sortie d'un SPAD de la matrice 4 sur la puce B du deuxième prototype avec à 50 ns de temps mort.

Variation de l'espace mort de SPAD

Des paires de SPAD sont développés et permettent l'évaluation de l'impact de l'espace-mort sur la probabilité de diaphonie. Un des SPAD de chaque paire est couvert de métallisation afin de garder le SPAD en obscurité. Une mesure de diaphonie pourrait être prise en exposant le SPAD aux photons et en observant l'augmentation du taux de comptage du SPAD couvert de métallisation. La figure 3.17 (a) montre 3 paires de SPAD avec différents espaces morts. Cette structure est conçue dans la puce pour des SPAD avec une isolation à puits n et à puits p ainsi que sans isolation.

Variation de la géométrie

La figure 3.17(b) montre des SPAD de différentes géométries servant à varier le diamètre ainsi que la périphérie des SPAD, et ce, indépendamment de leur surface en utilisant une forme rectangulaire. L'évaluation de ces structures permet d'une part la mesure de l'impact de l'anneau de garde sur le DCR. D'autres parts, elle permet de caractériser l'impact de la largeur minimale du SPAD sur le DCR.

De plus, des SPAD avec différents EAC et ENS sont conçus afin d'évaluer leur DCR et déterminer la structure optimale pour maximiser le facteur de remplissage tout en minimisant le DCR.

Finalement, des SPAD sont conçus avec une surface variant de 16 à 1200 μm^2 permettant l'évaluation de la dépendance de la surface des SPAD sur le DCR, l'*afterpulsing*, la diaphonie et la résolution

Éléments non fonctionnels de la matrice

Le HV2 est court-circuité au substrat par un espacement n+/substrat (ENS) de 1 et 0,5 μm sur les matrices 11 et 13. Ce court-circuit induit un courant important circulant dans la source haut-voltage empêchant le fonctionnement de tous les SPAD de cette branche. En effet, un courant continu de 12 mA est mesuré sur HV2 lorsqu'il est polarisé à 10 V et ce courant s'accroît jusqu'à 20 mA à 20 V. En fonctionnement normal, un courant continu de 5 mA est mesuré sur le HV0 et HV2 et ne dépend pas de la tension appliquée.

3.3.4 Matrices 3×3 (Puce D)

La figure 3.18 montre la puce D du deuxième prototype ainsi que ses deux matrices de 3×3 SPAD étouffés activement, avec le même circuit que la puce B. La puce a une sortie pour chacun des SPAD d'une matrice 3×3 permettant d'étudier la diaphonie entre les SPAD. De plus, les SPAD du milieu (S8 et S5) sont ouverts aux photons tandis que les SPAD du pourtour des matrices sont couverts de métal. Cette configuration permet l'étude de la diaphonie en exposant seulement le SPAD du milieu aux photons et en caractérisant l'impact du taux de comptage des SPAD adjacents. Cependant, l'étude de diaphonie avec cette méthode n'est pas valable due à la réfraction des photons entre les couches de métaux atteignant tous les SPAD (section 5.4.3).

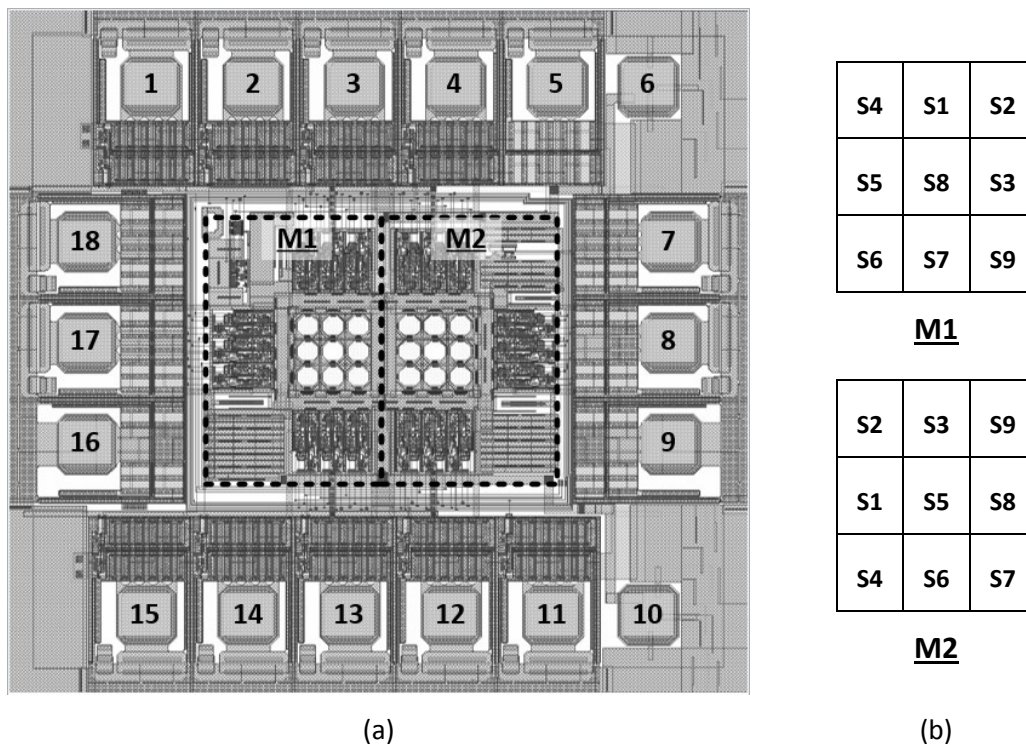


Figure 3.18 (a) Schéma de masque de la puce D du deuxième prototype contenant deux matrices de 3×3 SPAD avec circuits d'étouffement avec la numérotation des plots et (b) la numérotation des SPAD S1 à S9 pour chacune des matrices.

Un bit de contrôle *ENABLE* permet la sélection de la matrice acheminée vers la sortie. Chacune des matrices possède sa propre entrée haut voltage (HV) indépendante. Les détails des matrices ainsi que

la liste des plots sont décrits à l'annexe D. Les sorties sont des signaux numériques de 0 à 3,3 V, comme le montre la figure 3.19.

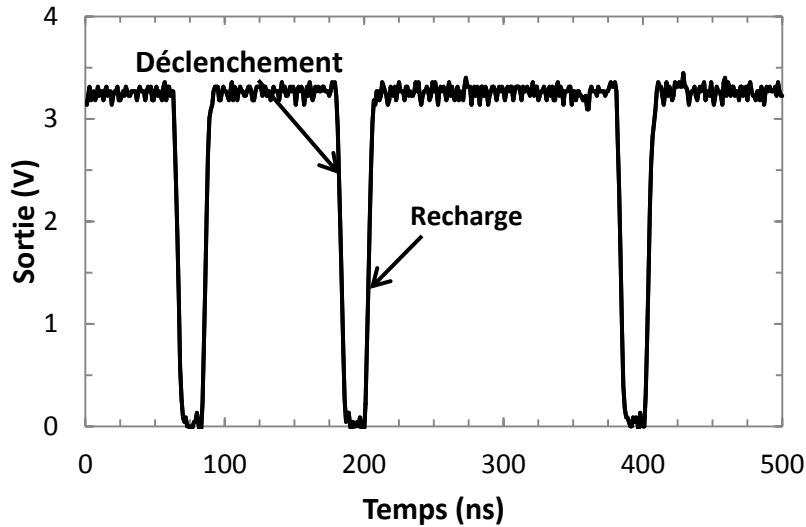


Figure 3.19 Signal de sortie d'un SPAD de la matrice 0 sur la puce D du deuxième prototype avec 25 ns de temps mort.

3.3.5 SPAD sans électronique (Puce E)

La figure 3.20 présente la puce E du second prototype contenant des SPAD sans électronique servant à la caractérisation des capacités de jonction et parasite des structures ainsi que des résistances de jonction. Ces derniers sont divisés en groupe (G1 à G6) de 3 à 5 SPAD avec une cathode commune pour chaque groupe. Les anodes se connectent individuellement sur des plots, tel qu'il est présenté à l'annexe E.

Les SPAD conçues sont tirées de SPAD de la puce B à l'exception des groupes G4 et G5. Pour cette raison, cette section détaille seulement les SPAD de ces deux groupes.

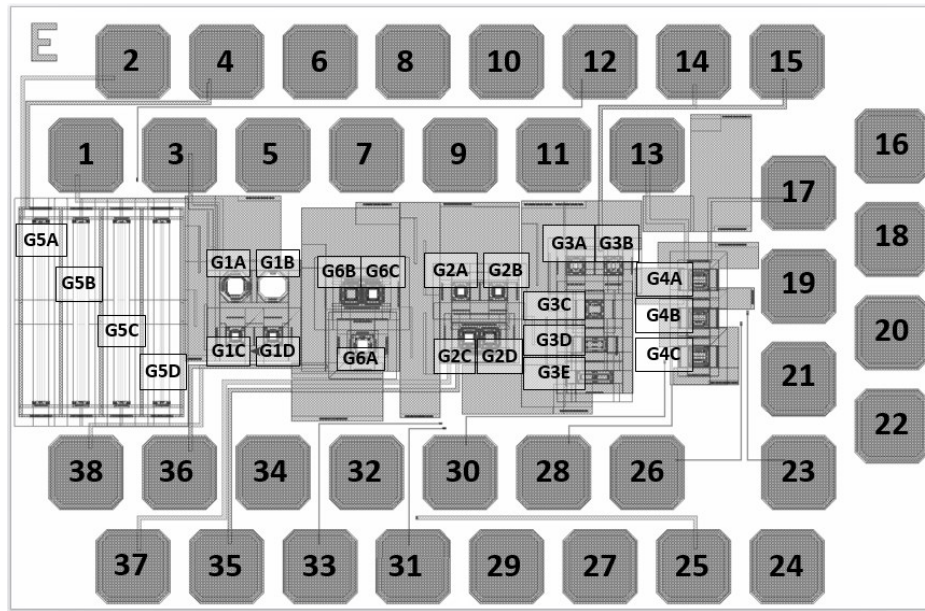


Figure 3.20 Schéma de masques de la puce E contenant des SPAD sans électronique et numérotation des plots et des SPAD.

G4 – SPAD à anneau de polysilicium

La figure 3.21 montre la vue en coupe d'un SPAD sur lequel on retrouve une couche de polysilicium en périphérie. Le polysilicium est celui utilisé pour les grilles des transistors 3,3 V de la technologie. Lors de la conception, la couche *active* permet d'avoir de l'oxyde de grille sous le polysilicium et non de l'oxyde de champ. Ainsi, en appliquant un potentiel électrique sur cette grille de polysilicium, un champ électrique s'applique en périphérie du SPAD. Ce champ électrique permet d'inverser la population en surface en appliquant un potentiel négatif (V^-) pour attirer des trous. Le cas échéant, un courant se mesure aux bornes des électrodes. En mode *Geiger*, cette structure permet d'évaluer si les porteurs injectés déclenchent le claquage des SPAD en périphérie et permet d'apprécier les propriétés de l'anneau de garde.

Cependant, cette structure est non fonctionnelle en mode *Geiger*. La grille utilisée pour ce SPAD peut supporter un maximum de 5 V. Pour être opérée en mode *Geiger*, la grille devrait chevaucher seulement le puits n . Par exemple, lorsqu'un tel SPAD serait opéré en mode *Geiger* à $V_A = 22$ V, il serait possible d'appliquer sur la grille entre 17 et 27 V, obtenant ainsi une différence de potentiel de ± 5 V entre la grille et le puits n . Dans le cas montré à la figure 3.21, la grille chevauche à la fois la région p^+ et le puits n . Ainsi, une différence de potentiel de 17 à 27 V est présente entre la région p^+ et la grille, claquant ainsi l'oxyde et rendant la structure inutilisable en mode *Geiger*.

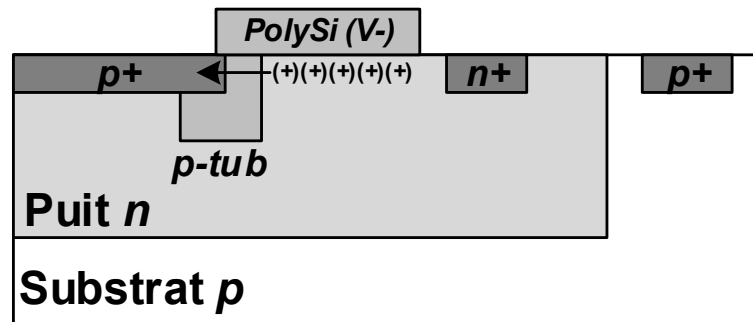


Figure 3.21 Vue en coupe d'un SPAD avec un anneau de polysilicium en périphérie du SPAD montrant le cas où un potentiel négatif (V-) est appliqué permettant l'inversion de population.

G5 – Structures dédiées à des mesures *Electron beam induced current* (EBIC)

La structure des SPAD conçue dans ce groupe est similaire aux SPAD de même nature de la puce B, mais est conçue en rectangle d'une longueur de 300 μm . Cette forme permet de cliver plus aisément les SPAD et prendre une mesure EBIC consistant à injecter des électrons à l'aide d'un microscope électronique dans la section du SPAD. Cette structure permet la caractérisation du champ électrique du SPAD incluant la zone de multiplication et l'anneau de garde.

3.3.6 Puce F – Structures de test pour TSV

Les structures de caractérisation de TSV sont intégrées dans les puces F1 et F2. Ces structures ont été conçues en seulement 2 journées et assemblées aux autres puces par *Teledyne DALSA* (figure 3.10). Étant donné la conception rapide, aucun calcul théorique n'a pu être fait pour l'élaboration de ces puces. Trois puces F1 ont ainsi été introduites ainsi qu'une puce F2. Cette section présente le contenu de ces 2 puces.

Puce F1

La figure 3.22 montre la puce F1 contenant 5 chaînes de TSV (D1 à D5), une structure de Kelvin, une structure permettant de mesurer la capacité d'un TSV et un plot d'interconnexion. Les interconnexions des TSV aux plots ainsi que leurs noms sont détaillés à l'annexe F.

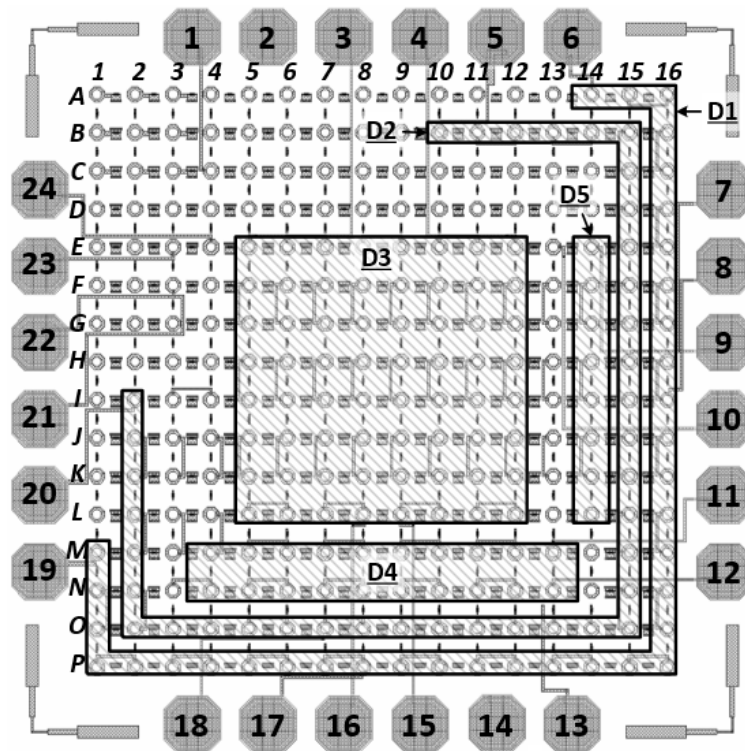


Figure 3.22 Schéma de masques de la puce F1 intégrant des structures de Kelvin, des chaînes de TSV ainsi que des structures de mesures CV.

Deux types de chaîne de TSV sont conçues dans la puce, les chaînes à quatre terminaux, telles que présentées à la figure 3.23 (D1, D2 et D3), et celles à deux terminaux (D4 et D5). Ces chaînes permettent d'une part une évaluation du rendement des TSV en prenant des mesures statistiques de résistance sur plusieurs échantillons. Les chaînes défectueuses se qualifient par une résistance élevée. Ainsi connaissant le nombre de TSV par chaîne, il est possible de déduire le rendement. D'autre part la résistivité des TSV peut également être mesurée.

Les chaînes à quatre terminaux sont destinées à des mesures de résistance 4 pointes permettant de s'affranchir de la résistance parasite des contacts en injectant un courant aux bornes des plots $KI+$ et $KI-$ et en mesurant la différence de potentiel aux bornes de $LI+$ et $LI-$, figure 3.23. Les chaînes de TSV à quatre terminaux présentent aussi un avantage lors de la mesure statistique de défauts en permettant la localisation plus précise de l'endroit dans la chaîne où les défauts se retrouvent.

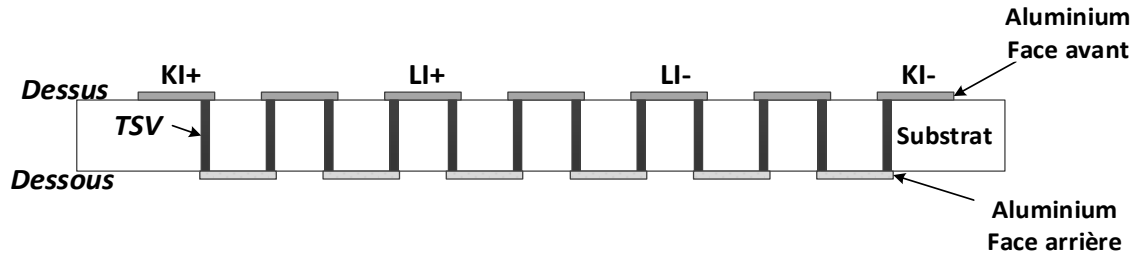


Figure 3.23 Vue en coupe d'une chaîne de TSV à quatre terminaux.

La structure de Kelvin présentée à la figure 3.24 permet de déterminer la résistance du TSV (R_{TSV}) en s'affranchissant de la résistance parasite des interconnexions au système de mesure. L'évaluation se fait en prenant une série de mesures de tension V_m lorsqu'on injecte différents courants I . La résistance se détermine par la moyenne de quatre mesures :

- Courant de Kelvin1 à Kelvin3 et mesure de la tension entre Kelvin2 et Kelvin4
- Courant de Kelvin3 à Kelvin1 et mesure de la tension entre Kelvin2 et Kelvin4
- Courant de Kelvin2 à Kelvin4 et mesure de la tension entre Kelvin1 et Kelvin3
- Courant de Kelvin4 à Kelvin2 et mesure de la tension entre Kelvin1 et Kelvin3

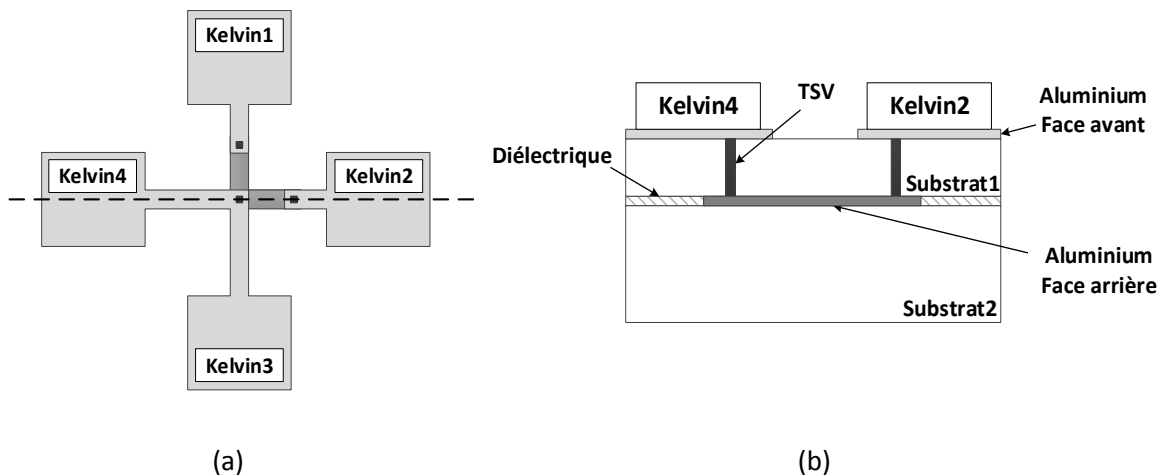


Figure 3.24 (a) Vue du dessus du dessin de masques d'une structure de Kelvin utilisée pour caractériser la résistance d'un TSV ainsi que (b), la vue en coupe.

Puce F2

La figure 3.25 montre la puce F2 contenant des structures dédiées aux mesures de capacité en radiofréquences (RF). Les plots (numérotés de 1 à 6) se connectent à un ou plusieurs TSV (voir annexe F). Deux plots connectés au substrat entourent les plots d'interconnexion aux TSV de manière

à obtenir une impédance vue par l'extérieur de 50 Ω . Cependant, le dimensionnement des plots a été fait grossièrement et aucun calcul n'a été fait.

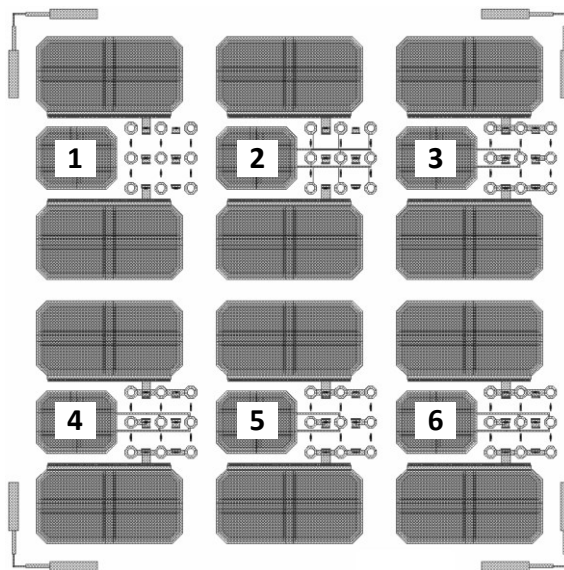


Figure 3.25 Puce F2 contenant des structures de mesures CV radiofréquences (RF).

3.3.7 Montage de caractérisation

La figure 3.26 montre les circuits imprimés utilisés pour tester le deuxième prototype. Avant d'y être collé, les puces B, C et D contenant l'électronique sont d'abord découpées. Un circuit imprimé appelé carte-fille a été conçu pour chacune de ces 3 puces afin de les coller et les microsolder. Le site du collage de la puce possède des via vers un pad thermique placé sous la carte destinée à accueillir un élément Peltier. Ainsi, la température se contrôle à l'aide d'une thermistance soudée près de l'ASIC.

Une carte-mère fournit les alimentations ainsi que les sources de courant pour les SPAD et les circuits d'étouffement. De plus, un microcontrôleur sur la carte-mère fournit la chaîne de configuration nécessaire à la puce B pour choisir le SPAD acheminé aux sorties de la puce. Le microcontrôleur permet également l'ajustement du courant fourni par les sources à l'aide d'un convertisseur numérique analogue afin de contrôler le temps mort ainsi que le temps de recharge des circuits d'étouffement.

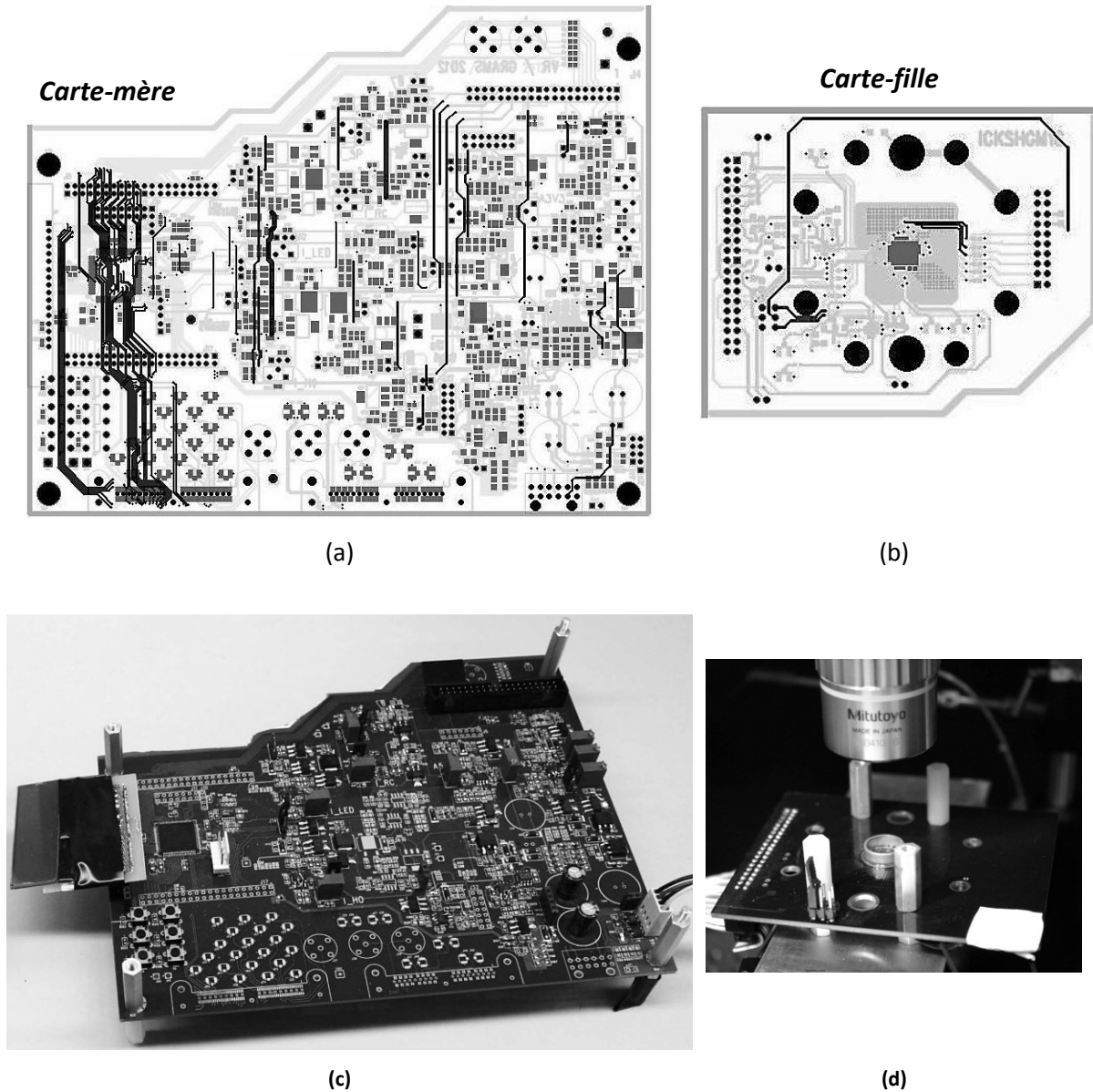


Figure 3.26 Schémas de masque de (a) la carte-mère et (b) la carte-fille, ainsi que les photographies de (c) la carte-mère et (d) la carte-fille.

Limitations du montage

Les puces sont encapsulées sur les cartes-filles dans un boîtier de type TO avec une fenêtre en verre laissant passer la lumière. Le boîtier est monté à l'air ambiant, encapsulant avec lui de l'humidité qui tend à condenser lorsque la température baisse sous les 10°C . La condensation a pour effet d'induire un courant de surface entre les plots, particulièrement fatal pour les signaux de haut voltage ($>20\text{ V}$). La source de tension sur la carte-mère ne peut alors fournir suffisamment de courant et les circuits deviennent inutilisables.

Pour contrer ce problème, les tests se font dans un réfrigérateur et la puce est chauffée de quelques degrés à l'aide de l'élément Peltier. De cette façon, la majorité de la condensation se fait sur les parois du boîtier TO à température plus faible et non sur la puce gardée à une température légèrement plus élevée. Cette méthodologie assure le bon fonctionnement du système.

De plus, les microfils d'aluminium utilisés étaient vraisemblablement trop courts et les interconnexions ont cédées après quelques cycles thermiques de $\pm 40^{\circ}\text{C}$. Ainsi, peu de tests en température ont pu être accomplis.

CHAPITRE 4. CARACTÉRISATION

Ce chapitre résume les méthodes de modélisation et de caractérisation utilisées ainsi que les résultats de mesures des paramètres des SPAD. On y retrouve la caractérisation de la tension de claquage, la résistance de jonction, la capacité de jonction et parasite, le DCR, l'*afterpulsing*, la diaphonie, la PDP et la résolution temporelle.

4.1 Tension de claquage

La tension de claquage est sans doute le paramètre le plus important d'un SPAD puisqu'il fournit de l'information cruciale sur le comportement du SPAD ainsi que sur le profil de jonction. Plus le profil de jonction est étroit, plus la tension de claquage est faible, plus le taux de génération bande à bande augmente ainsi que le DCR.

Aussi, un profil de jonction plus étroit augmente la capacité de jonction. Tel que vu aux sections 2.4.3 et 2.4.5, une augmentation de la capacité de jonction augmente la probabilité d'*afterpulsing* et détériore les performances en temps.

Une tension de claquage faible peut être causée par un champ électrique élevé en périphérie et par le dysfonctionnement de l'anneau de garde. Une jonction à faible tension de claquage peut rendre le SPAD inutilisable.

Méthode en mode linéaire

Les jonctions du premier prototype et les jonctions de la puce E du deuxième prototype sont conçues pour être utilisées en mode linéaire ou avec un étouffement passif. La tension de claquage se détermine alors par une mesure IV. On balaie une tension de polarisation en inverse de la diode et la tension de claquage est déterminée lorsque le courant atteint 100 μA . Ce courant de seuil, décrit dans la littérature, représente le flux de charge minimum pour que la probabilité que l'avalanche s'étouffe d'elle-même soit faible [76].

Méthode en mode Geiger

La majorité des SPAD du deuxième prototype s'éteignent activement et le flux de charge circulant lors d'un claquage ne peut se mesurer. Pour cette raison, la tension de claquage se détermine de façon arbitraire par la tension où au moins 10 cps sont mesurés à la sortie du circuit d'éteignement. À ce voltage, on soustrait 1,4 V, la tension de seuil du circuit d'éteignement.

4.1.1 Premier prototype

Pour le premier prototype, la caractérisation de la tension de claquage permet d'abord de conclure que le SPAD S (annexe A) est la structure la plus prometteuse pour être opérée en mode *Geiger*. Cette structure utilise un puits profond et un anneau de garde *p-tub* et présente une tension de claquage de 19,2 V à 25°C.

Les SPAD A, B, F, K, L, P, Q et U, utilisent un anneau de garde trop profond qui appauvrit complètement le puits *n* de porteurs causant une tension de claquage très élevée, ≥ 40 V. Ce phénomène est mis en évidence par la simulation (section 3.1).

Les SPAD C, G, H, I, J et M utilisent un puits p^{23} comme anneau de garde avec différents espacements et présentent une tension de claquage variant de 19 V à 25V. Cette grande variation de la tension de claquage semble démontrer que l'anneau de garde appauvrit plus ou moins le puits *n*. Ce comportement indésirable montre une importante dépendance entre le choix de conception et la tension de claquage. Pour cette raison, cette structure n'est pas étudiée plus en profondeur.

Les SPAD D, E, N, R et T n'utilisent pas d'anneau de garde et présentent une tension de claquage autour de 14, 21 et 23 V. Le SPAD O a une tension de claquage de 18 V, plus faible que le SPAD S. Dans tous ces cas à ces tensions, le mécanisme de claquage doit tout de même provenir en partie de l'ionisation par impact et ces SPAD pourraient donc s'opérer en mode *Geiger*. Cependant, leurs anneaux de garde sont inexistantes et le claquage se fait latéralement plutôt que dans la région photosensible (section 5.1). Ils devraient donc avoir une PDP faible, voire nulle. Pour cette raison, ces structures ne sont pas intégrées au deuxième prototype pour une étude de PDP.

²³ Le puits *p* est une diffusion plus profonde que le *p-tub*, utilisé pour le SPAD S. Ce sont deux diffusions distinctes.

4.1.2 Deuxième prototype

Les SPAD à anneau de garde par diffusion typique du deuxième prototype (figure 3.11 (a)) ont une tension de claquage se situant autour de 19,6 V à 25°C. La tension de claquage est plus élevée de 200 mV par rapport au même SPAD du premier prototype. Cette variation peut être causée par les méthodes différentes utilisées pour déterminer la tension de claquage. Pour le premier prototype, on utilise le courant de seuil de 100 μ A sur une courbe IV et pour le deuxième prototype on utilise la mesure du taux de comptage à la sortie du circuit d'étouffement. Cette différence de tension de claquage peut provenir également de la variation intrinsèque du procédé de fabrication.

La tension de claquage du SPAD à anneau de garde virtuel dans le puits profond se situe autour de 14 V. L'anneau de garde virtuel semble donc moins efficace dans le puits profond que l'anneau de garde par diffusion puisque sa tension de claquage est plus faible. Pour cette raison, les autres paramètres de ce SPAD n'ont pas été caractérisés ni étudiés d'avantage.

Effets de la température

La tension de claquage des SPAD augmente avec la température pour les deux types de SPAD, tel que démontré à la figure 4.1. Pour le deuxième prototype, le SPAD à anneau de garde par diffusion typique a une variation de 20 mV/°C et le SPAD à anneau de garde virtuel, 24 mV/°C. Le premier prototype a une variation moindre, évaluée à 18 mV/°C. Cette différence peut être attribuée à la dimension du SPAD, de 100 μ m de diamètre pour le SPAD S du prototype 1 et 14,2 μ m²⁴ pour le SPAD à anneau de garde par diffusion du deuxième prototype (matrice de la puce B). La géométrie pourrait également expliquer cette différence. La largeur effective du SPAD semble affecter également le DCR normalisé et est présenté à la section 4.4.4).

La pente de variation de température dépend du ratio de génération bande à bande par rapport à l'ionisation par impact prenant part au mécanisme de claquage puisque ces deux phénomènes varient à l'inverse l'un de l'autre en fonction de la température. L'ionisation par impact a un coefficient de variation négative en température et la génération bande à bande un coefficient positif.

²⁴ Le diamètre correspond à la région de multiplication du SPAD et n'inclut donc pas l'anneau de garde.

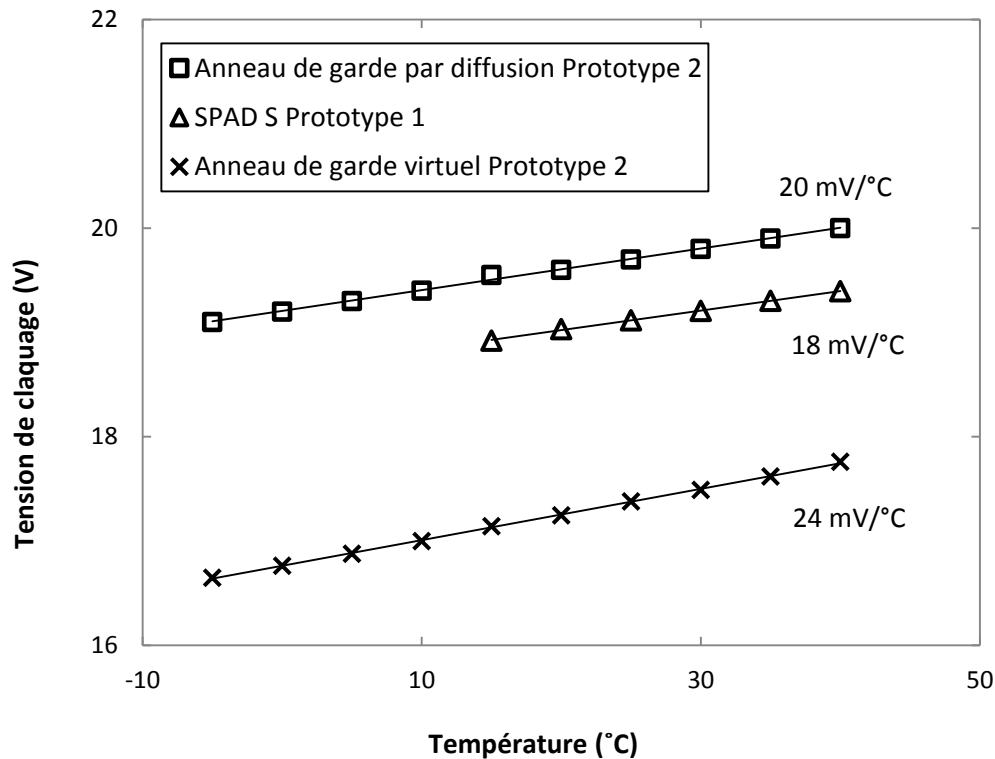


Figure 4.1 Tension de claquage en fonction de la température pour le SPAD S du premier prototype à anneau de garde par diffusion et les SPAD à anneau de garde virtuel et par diffusion du deuxième prototype.

4.2 Résistance de jonction

La résistance de jonction R_D du SPAD sert principalement à modéliser les SPAD (représenté à la figure 2.14 (b)) avec SPICE et simuler le comportement de ces derniers avec le circuit d'étouffement. Avec la capacité de jonction, cette résistance permet d'estimer la constante de temps de l'avalanche soutenue et de justifier les performances en temps du dispositif.

La résistance de jonction R_D des SPAD se détermine par la pente de la courbe IV au-dessus de la tension de claquage, c.-à-d. à un courant $>100 \mu\text{A}$. La figure 4.2 montre les résultats provenant de deux SPAD du deuxième prototype avec un anneau de garde virtuel et à diffusion. Lorsque la tension augmente, le courant augmente et cause une augmentation de la température. Ce phénomène s'observe par les deux courbes démontrant une dérive causée par la température. La tension de claquage diminue alors,

modifiant ainsi la pente du courant en fonction de la tension. Pour cette raison, R_D est extrait de la partie linéaire sous les 2 premiers milliampères.

Tel qu'il est montré au tableau 4.1, la résistance de jonction du SPAD S sur le premier prototype est 1,1 k Ω . Sur le second prototype, un SPAD similaire a une résistance de 300 Ω . Il semble probable que cette variation soit causée par la largeur des anneaux de garde. Un anneau de garde plus large augmente le parcours du courant dans la jonction, augmentant ainsi la résistance. Le SPAD S du premier prototype à un anneau de garde de 4 μm et dans le deuxième prototype on utilise exclusivement un anneau de garde de 0,8 μm . Les SPAD à anneau de garde virtuel présentent une résistance de jonction de 1,3 k Ω et 860 Ω selon la largeur de l'anneau de garde (LAG).

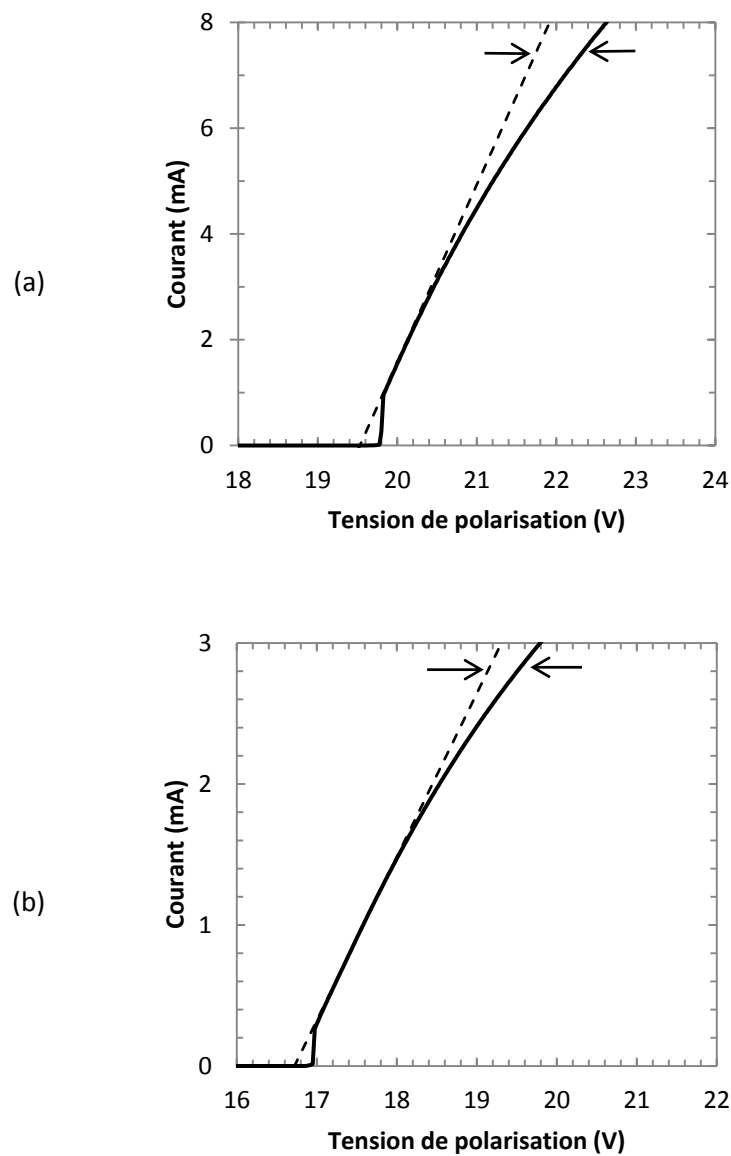


Figure 4.2 Courant de la cathode en fonction de la tension à la cathode polarisant le SPAD en inverse pour (a) le SPAD D du groupe 2 de la puce E du deuxième prototype à anneau de garde à diffusion de $0,8\ \mu\text{m}$ de large et (b) SPAD A du groupe 2 de la puce E du deuxième prototype à anneau de garde virtuel de $1\ \mu\text{m}$ de large.

Tableau 4.1 Résistance de jonction du premier et deuxième prototype.

<u>Prototype</u>	<u>Type d’anneau de garde</u>	<u>Identification du SPAD</u>	<u>Largeur de l’anneau de garde (μm)</u>	<u>R_D (Ω)</u>
1	Diffusion	SPAD S	4,0	1100
2	Diffusion	SPAD D du groupe 2 de la puce E	0,8	300
2	Virtuel	SPAD B du groupe 2 de la puce E	2,0	860
2	Virtuel	SPAD A du groupe 2 de la puce E	1,0	1300

4.3 Capacité parasite

Cette section présente une méthode pour déterminer les capacités de jonction et parasites des SPAD utilisant des mesures CV. Cette section présente aussi les résultats des principaux SPAD du premier prototype.

4.3.1 Mesures CV

Les capacités de jonction se caractérisent à l’aide de mesures CV qui consistent à balayer une tension continue sur laquelle on applique une tension alternative typiquement de 20 mV à 1 MHz. On mesure alors le courant. La capacité peut ensuite s’extraire en y appliquant un modèle. La longueur des câbles servant à la mesure doit être compensée dans le modèle. L’appareil utilisé est un *Keithley 4200* utilisant une station sous-pointe permettant d’automatiser le test et compenser pour une longueur de câbles de 1,5 m automatiquement.

Lors de mesures de faible capacité (<10 pF), il est nécessaire de faire une correction de circuit ouvert, c’est-à-dire de prendre une mesure CV en circuit ouvert [98]. La capacité finale (C_F) devient :

$$C_F = \left[\frac{1}{C_M} - \frac{1}{C_O} \right]^{-1} \quad \text{Éq. 4.1}$$

où C_M est la capacité mesurée du dispositif et C_O la capacité mesurée en circuit ouvert.

La capacité des plots (C_{Plot}) au substrat lors des mesures doit être prise en compte afin d'obtenir une valeur de capacité représentative des jonctions pn . C_{Plot} se calcule théoriquement à l'aide des épaisseurs de diélectrique de la technologie CMOS utilisée et est évaluée à 3,2 pF.

4.3.2 Modèle des capacités de jonction

Un SPAD tel que ceux développés dans ce projet se modélise avec deux conducteurs (anode et cathode) sur un plan de masse (substrat). Ce modèle comprend alors trois capacités ; anode-cathode (C_{AC}), anode-substrat (C_{AS}) et cathode-substrat (C_{CS}) [76]. Le modèle du SPAD avec les capacités des plots d'interconnexion est présenté à la figure 4.3.

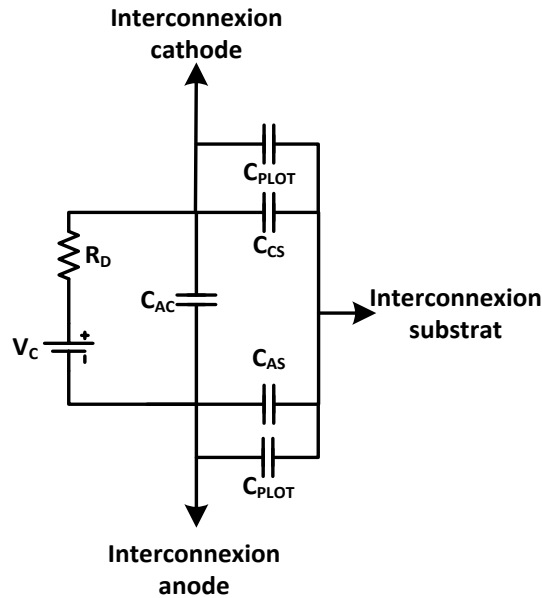


Figure 4.3 Modèle des capacités parasites du SPAD avec les capacités parasites d'interconnexion des plots.

La méthode à deux terminaux consiste à mesurer chacune des capacités C^{2T} telles que :

- 1) C_{AC}^{2T} : Mesure entre anode (ou cathode) et substrat avec anode et cathode court-circuitées.
- 2) C_{AS}^{2T} : Mesure entre anode et substrat avec cathode court-circuitée au substrat.
- 3) C_{CS}^{2T} : Mesure entre cathode et substrat avec anode court-circuitée au substrat.

Dans le cas de C_{AC}^{2T} , deux fois la valeur de C_{Plot} doit être soustrait à la valeur mesurée. Dans les cas de C_{AS}^{2T} et C_{CS}^{2T} , une fois la valeur de C_{Plot} doit être soustrait à la valeur mesurée.

Basé sur les relations de Maxwell, les capacités du modèle décrit s'extraient des mesures par [99] :

$$C_{AC} = \frac{1}{2} (C_{AS}^{2T} + C_{CS}^{2T} - C_{AC}^{2T}) \quad \text{Éq. 4.2}$$

$$C_{AS} = \frac{1}{2} (C_{AS}^{2T} + C_{AC}^{2T} - C_{CS}^{2T}) \quad \text{Éq. 4.3}$$

$$C_{CS} = \frac{1}{2} (C_{CS}^{2T} + C_{AC}^{2T} - C_{AS}^{2T}) \quad \text{Éq. 4.4}$$

4.3.3 Résultats

Les capacités sont mesurées sur le SPAD S du premier prototype et sont présentées au tableau 4.2. C_{AC} normalisé en fonction de l'aire est 0,156 fF/ μm^2 .

Tableau 4.2 Capacité de jonction du SPAD S du premier prototype.

C_{AC} (pF)	C_{CS} (pF)	C_{AS} (pF)
1,225	0,875	0,175

Les SPAD intégrés au deuxième prototype sont de plus petite taille et on peut s'attendre à une capacité C_{AC} de 30 fF, trop faible pour être mesurable avec l'équipement disponible.

4.4 Mesure du DCR

Le DCR joue un rôle déterminant dans la sensibilité du détecteur. De plus, le DCR permet d'apprécier le profil de jonction ainsi que la qualité de la microfabrication du dispositif. Le DCR est à ce point sensible aux défauts dans la structure cristalline du silicium qu'il pourrait même permettre de surveiller et contrôler la qualité de technologies CMOS et optoélectronique. Un DCR élevé d'un SPAD peut indiquer un taux élevé de génération bande à bande ou une concentration importante de défauts dans la structure cristalline.

4.4.1 Méthode de caractérisation

Nous avons mesuré le taux de comptage des SPAD avec un oscilloscope *LeCroy SDA6000a* connecté sur le signal de sortie du circuit d'éteuffement du SPAD à caractériser. Le temps mort du circuit d'éteuffement est typiquement ajusté à 50 ns. Les délais entre chaque évènement sont compilés dans

un histogramme. L'inverse de la valeur moyenne de l'histogramme indique le DCR. L'histogramme permet la mesure rapide du taux de comptage.

Le taux de comptage mesuré (D_{Brut}) s'exprime en compte par seconde (s^{-1}). Cette mesure néglige les comptes survenus pendant le temps mort du SPAD (t_m). Le temps mort total (t_t) compris dans une seconde de mesure dépend du taux de comptage du SPAD mesuré et se calcule selon :

$$t_t = D_{Brut} t_m \quad \text{Éq. 4.5}$$

Le taux de comptage correspondant aux nombres d'évènements survenus durant le temps mort (D_c) peut ainsi s'estimer selon :

$$D_c = D_{Brut} t_t \quad \text{Éq. 4.6}$$

Finalement, le taux de comptage corrigé (D) comprenant les comptes cachés par le temps mort se calcule par :

$$D_{Brut-c} = D_{Brut} + D_{Brut}^2 t_m \quad \text{Éq. 4.7}$$

De plus, la contribution des évènements provenant de l'*afterpulsing* est extraite de la mesure de DCR. Ainsi, le DCR tel qu'exprimé dans les résultats de cette section provient principalement des porteurs thermiques ou de la génération bande à bande. La probabilité d'*afterpulsing*, mesurée selon la procédure décrite à la section 4.5 permet d'extraire le taux de comptage D , du taux de comptage brut D_{Brut} selon :

$$D = D_{Brut-c} (1 - P_a) \quad \text{Éq. 4.8}$$

4.4.2 Effet de la tension d'opération

La figure 4.4 présente le DCR normalisé en fonction de la tension excédentaire (V_E) du SPAD S du premier prototype. La figure montre que le DCR normalisé sature à partir de $V_E = 0,5$ V car le taux de comptage devient trop important ne laissant plus de temps pour de nouveaux évènements. Le taux de comptage atteint 1 million de comptes par seconde à $V_E = 0,7$ V. Ce taux de comptage élevé est causé par sa grande superficie.

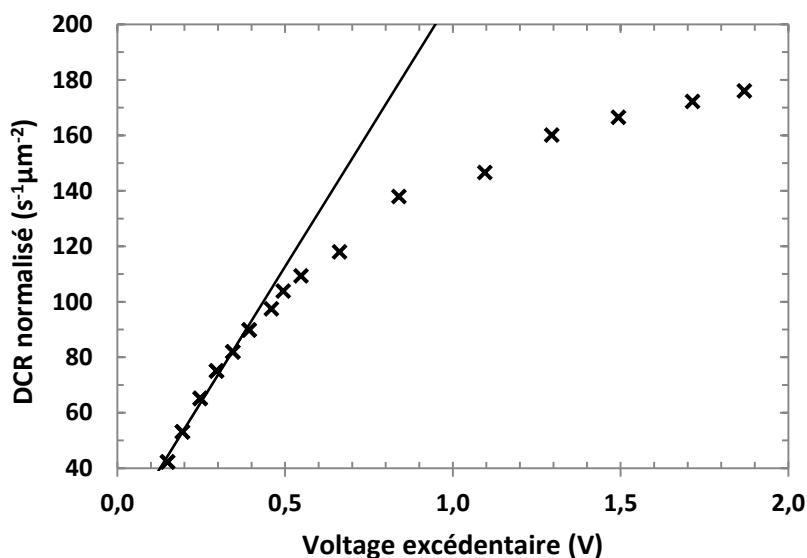


Figure 4.4 DCR en fonction de la tension excédentaire pour le SPAD S du premier prototype à 27°C, une superficie de 7 800 μm² et DCR de 1 000 000 à $V_E=0,7V$.

Les SPAD sur le deuxième prototype sont plus petits et présentent un DCR brut moins élevé. Ces derniers s'opèrent à moins de 1 million de comptes par secondes sur une plus grande plage de tension en évitant une saturation du SPAD.

La figure 4.5 montre une dépendance linéaire du DCR en fonction de V_E de SPAD du deuxième prototype. De plus, une augmentation du DCR de 2000 s⁻¹ μm⁻² à $V_E = 4 V$ s'observe lorsque le diélectrique est gravé au-dessus de la région photosensible (section 3.3.3). Cette augmentation s'explique par une possible gravure du silicium causé par une surgravure du diélectrique. La figure montre également un DCR du SPAD à anneau de garde par diffusion typique de 1500 s⁻¹ μm⁻² plus élevé que le SPAD à anneau de garde virtuel. En effet, le SPAD à anneau de garde virtuel utilise un puits peu profond, limitant ainsi la diffusion de porteur thermique, expliquant en partie la différence importante de DCR.

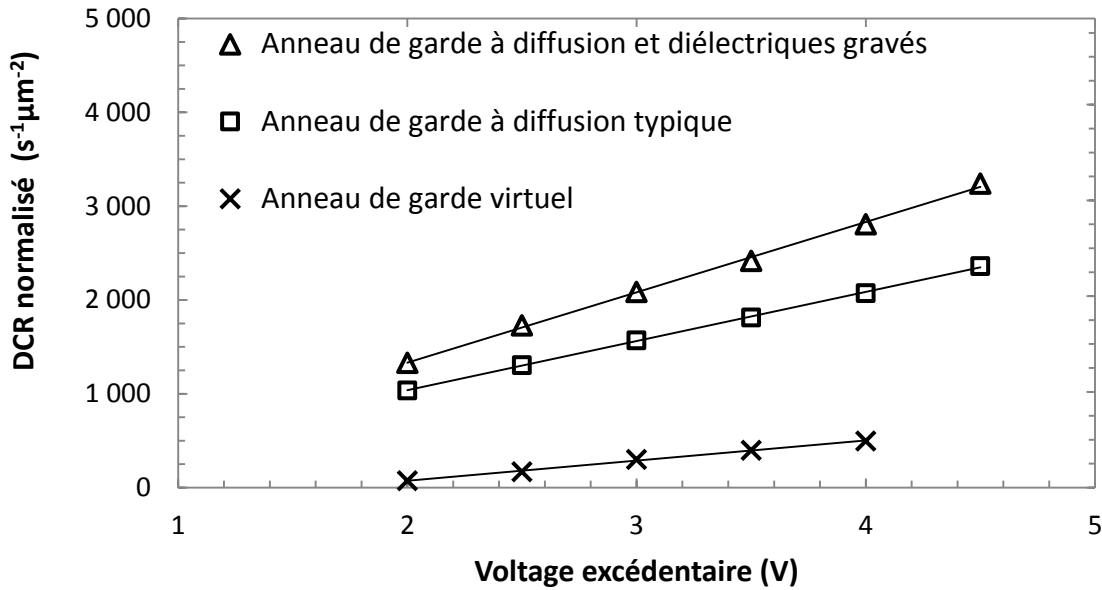


Figure 4.5 DCR en fonction de la tension excédentaire pour le SPAD à anneau de garde par diffusion avec (SPAD 1, matrice 0 de la puce B) et sans gravure du diélectrique (SPAD 2, matrice 6 de la puce B) et pour le SPAD à anneau de garde virtuel (SPAD 1, matrice 7 de la puce B) à 25°C pour le deuxième prototype.

4.4.3 Effet de la température

La figure 4.6 montre la dépendance du DCR en fonction de la température et le tableau 4.3, les coefficients de l'exponentielle correspondant aux lissages de courbes. Le SPAD S du premier prototype est polarisé à $V_E = 0,3$ V et présente donc un DCR moins élevé que son homologue du deuxième prototype polarisé à $V_E = 2$ V.

Le SPAD S du premier prototype et le SPAD à anneau de garde par diffusion du deuxième prototype montrent une dépendance exponentielle à la température. Le SPAD à anneau de garde virtuel montre deux dépendances exponentielles distinctes, une de -20 à 5°C et une seconde de 5 à 40°C. L'exponentielle à faible température (de -20 à 5°C) avec un coefficient de 0,012 s'explique par la contribution dominante de la génération bande à bande assistée ou non de pièges, phénomène à faible dépendance en température. En augmentant la température, la contribution des porteurs thermiques devient la contribution dominante au DCR et l'on observe une exponentielle avec un coefficient de 0,043 [72]. Ce même comportement n'a pu être validé avec les SPAD à diffusion des prototypes 1 et 2

puisque les cycles en température ont détériorés les microfils de la puce rendant impossible la mesure à plus basse température.

La pente plus abrupte à des températures au-delà de 5°C du SPAD à anneau de garde par diffusion comparé au SPAD à anneau de garde virtuel signifie que le DCR a une plus forte dépendance à la température. Ce phénomène tant ainsi à démontrer que le mécanisme de claquage de ce dernier est plus fortement dominé par la génération SRH.

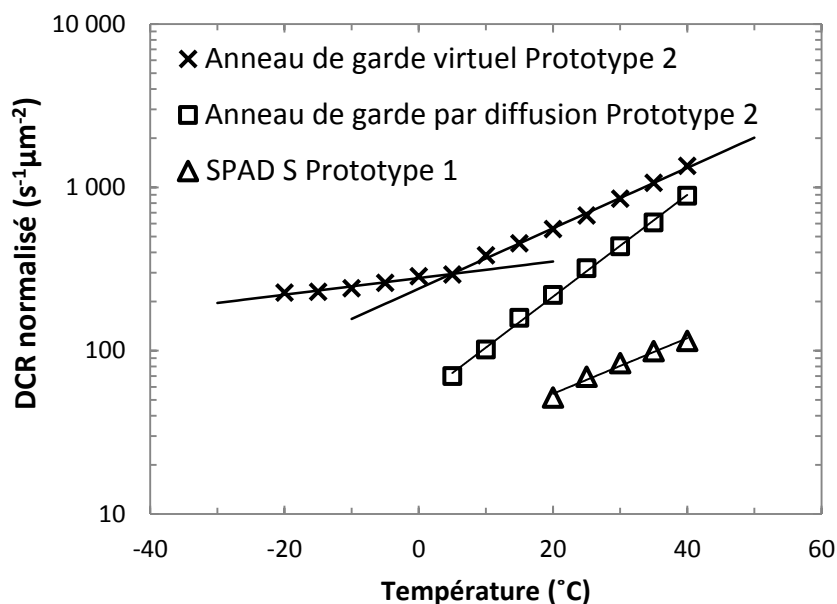


Figure 4.6 DCR en fonction de la tension excédentaire pour le SPAD S du premier prototype à $VE = 0,3$ V, SPAD à anneau de garde par diffusion (SPAD 1, matrice 6 de la puce B) et SPAD avec anneau de garde virtuel (SPAD 1, matrice 7 de la puce B) du deuxième prototype opéré à $VE = 2$ V²⁵.

²⁵ Le SPAD à anneau de garde de la figure 4.5 possède un DCR plus faible que le SPAD similaire à la figure 4.6. Il est difficile de déterminer la cause exacte de DCR différent puisque peu de variation de structure de SPAD à anneau de garde virtuel sont intégrés et l'échantillon statistique est faible.

Tableau 4.3 Coefficient exponentiel de la température du lissage de courbes de la figure 4.6.

SPAD	Coefficient α de l'exponentielle ($e^{\alpha T}$)
Anneau de garde virtuel du deuxième prototype (basse température)	0,012
Anneau de garde virtuel du deuxième prototype (haute température)	0,043
Anneau de garde par diffusion du deuxième prototype	0,072
SPAD S du premier prototype	0,039

4.4.4 Impact du design

La figure 4.7 montre le DCR de 4 SPAD de la matrice 1 de la puce B du deuxième prototype montrant l'impact de l'espacement anode-cathode EAC (figure 3.11) et la symétrie des contacts sur le DCR. La figure montre qu'il est possible de réduire le DCR de plusieurs centaines de $s^{-1}\mu m^{-2}$ à moins de $100 s^{-1}\mu m^{-2}$ avec un EAC de plus de $4 \mu m$ et une distribution uniforme des contacts. Ce comportement indique que de la génération bande à bande se produit à faible EAC. Ce comportement peut être causé par une augmentation du champ électrique en périphérie du SPAD, induisant des comptes en obscurité.

De plus, la distribution des contacts à l'anode et la cathode semble impacter le DCR. L'augmentation du DCR peut s'expliquer par la réduction du nombre de contacts et la distribution de ces derniers seulement sur un des côtés du SPAD. Ainsi, la densité de courant instantané à chaque claquage est augmentée, la température locale augmente également ainsi que les porteurs thermiques. Une concentration uniforme des contacts est donc souhaitée afin de réduire le DCR des SPAD.

La figure 4.8 montre les 6 SPAD de la matrice 3 de la puce B pour différentes tensions excédentaires de polarisation. La figure confirme la tendance décrite plus haut et montre bien une diminution moyenne du DCR des SPAD de $EAC = 4 \mu m$ comparativement aux SPAD avec $EAC = 2 \mu m$. Par contre, la figure montre également que les SPAD $EAC = 8 \mu m$ ont plus de DCR en moyenne que les SPAD $EAC = 4 \mu m$. Cette augmentation peut s'expliquer par une augmentation du volume de la région

non-active des SPAD à plus grand EAC. Ce plus grand volume collecterait plus de porteurs thermiques qui engendrent plus de DCR comparativement aux SPAD avec un plus petit volume.

Ces expériences permettent de conclure qu'une distribution uniforme des contacts et un EAC de 4 μm permettent de réduire le DCR des SPAD.

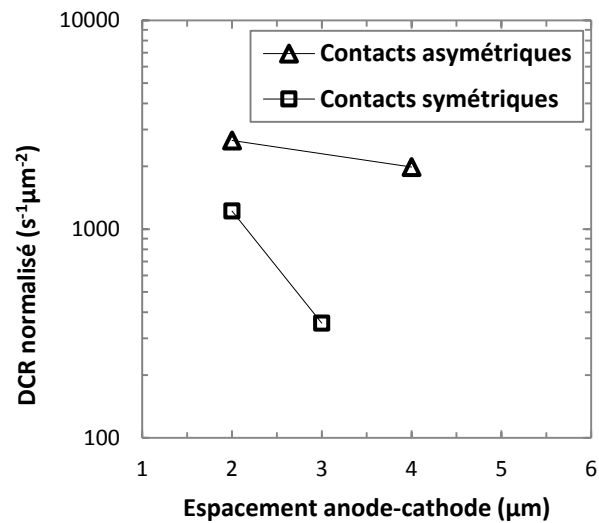


Figure 4.7 DCR en fonction de l'espacement anode-cathode de SPAD à anneau de garde à diffusion de la matrice 1 de la puce B du deuxième prototype à $V_E = 3\text{ V}$, temps mort de 50 ns et 25°C .

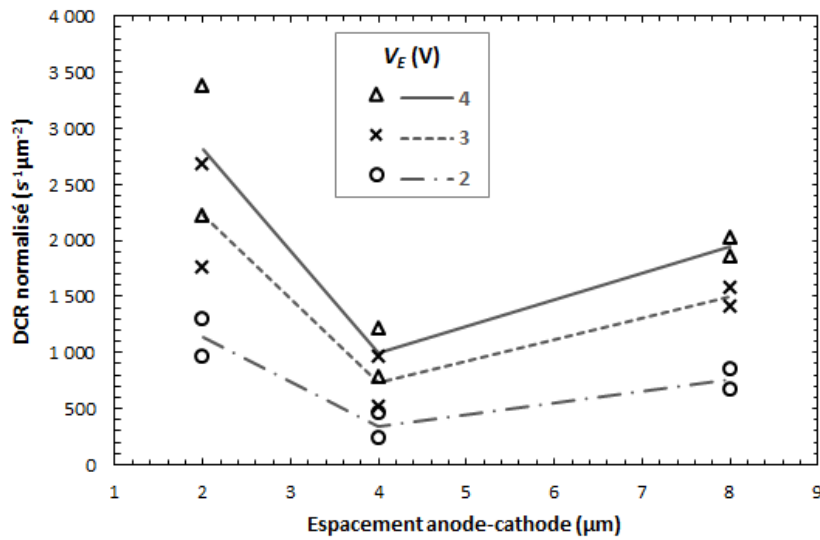


Figure 4.8 DCR en fonction de l'espacement anode-cathode des 6 SPAD à anneau de garde à diffusion de la matrice 3 de la puce B du deuxième prototype montrant également la valeur moyenne du DCR pour différents voltages excédentaires et temps mort de 50 ns et 25°C.

4.4.5 Impact de la tension de claquage

Le DCR de SPAD ayant une tension de claquage en dessous de 25 V possède un champ électrique de jonction suffisamment élevé pour avoir de la génération bande à bande de porteurs qui détériore le DCR [72]. Cette tendance est présentée aux figure 4.9 (a) et (b) où l'on voit le DCR en fonction de la tension de claquage pour des SPAD à anneau de garde par diffusion et une isolation à puits n provenant des matrices M1, M4 et M6 de la puce B. Les deux figures montrent essentiellement les mêmes tendances. La figure 4.9 (a) distingue les données en fonction de l'EAC des SPAD, variant de 2 à 6 μm . La figure 4.9 (b) distingue les données en fonction de leurs largeurs minimales de surface photosensible, variant de 1,4 à 15,9 μm . Il est à noter que certains SPAD sont rectangulaires et la largeur minimale correspond alors au côté le plus petit du rectangle.

Les données montrent une forte dépendance de la tension de claquage sur le DCR. On y voit qu'une augmentation de 0,5 V de la tension de claquage réduit le DCR de $500 \text{ s}^{-1}\mu\text{m}^{-2}$. L'important taux de génération bande à bande dans ces SPAD explique le DCR beaucoup plus important pour les tensions de claquage plus faible.

L'EAC des SPAD ne semble pas affecter la tension de claquage des SPAD. Par contre, la tension de claquage des SPAD avec une largeur minimale $<4\text{ }\mu\text{m}$ semble moins affecter le DCR que les autres SPAD. Le faible DCR associé à ces SPAD pourrait s'expliquer par le plus faible taux de génération bande à bande. Une des hypothèses expliquant ce phénomène est que la dimension de la surface photosensible est si petite que la diffusion latérale du p -tub utilisée comme anneau de garde réduit le dopage effectif du puits n .

Le meilleur DCR mesuré provient d'un SPAD dans la matrice 4 de la puce B du deuxième prototype et est de $3\text{ s}^{-1}\text{ }\mu\text{m}^{-2}$. Le SPAD possède une surface photosensible de $13\text{ }\mu\text{m}^2$, un $\text{EAC} = 6\text{ }\mu\text{m}$ et une distribution uniforme des contacts.

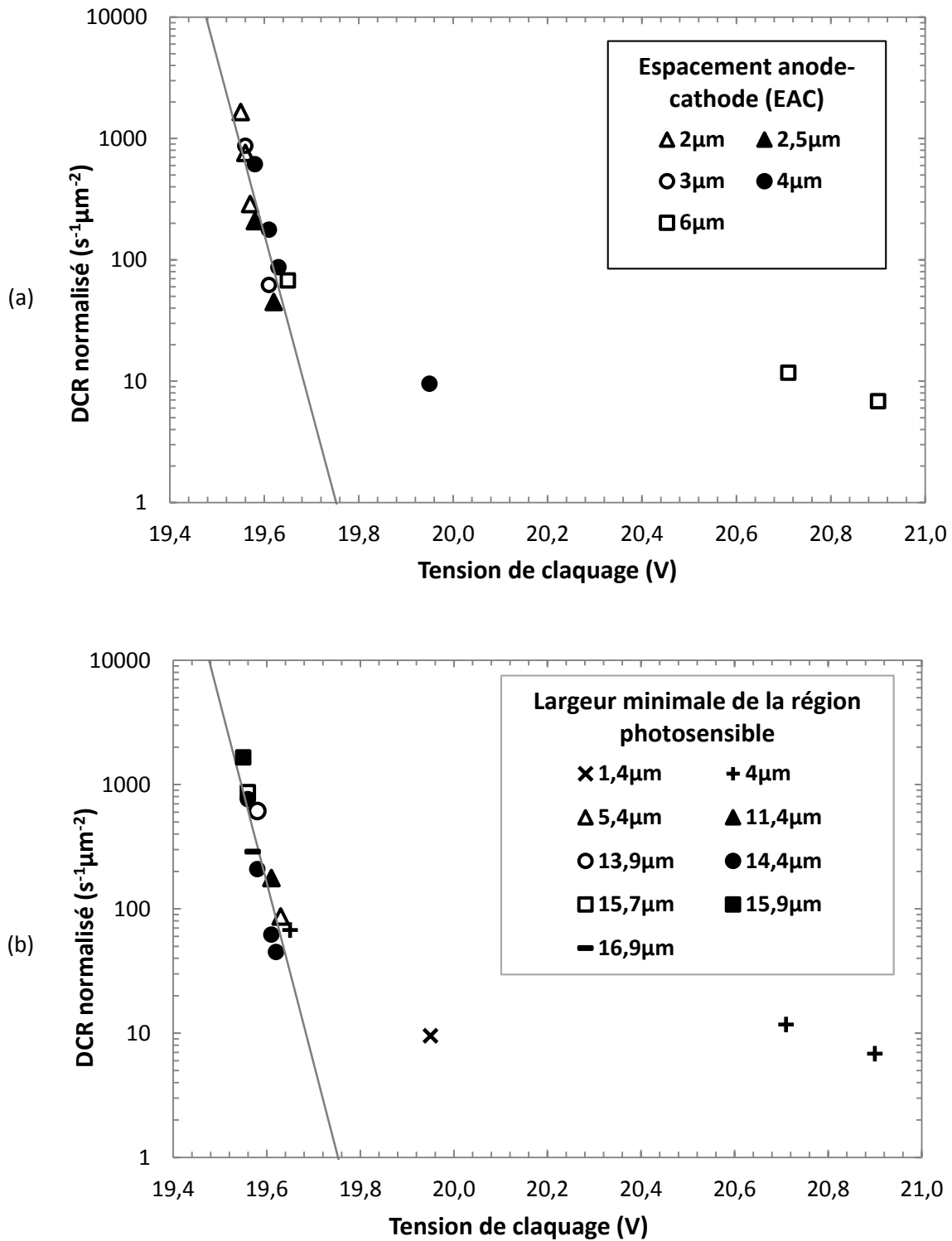


Figure 4.9 DCR en fonction de la tension de claquage pour les SPAD à anneau de garde par diffusion avec une isolation à puits n provenant de M1, M4 et M6 de la puce B à $V_E = 2$ V et $T_M = 50$ ns présenté en fonction de (a) l'espacement anode-cathode et (b) la largeur minimale de la région photosensible.

4.5 Afterpulsing

La caractérisation de l'*afterpulsing* se fait dans ce projet par la méthode de lissage (appelée en anglais *curve fit*). La méthode d'autocorrélation, couramment utilisée dans la littérature, est également présentée. Les deux méthodes permettent de mettre en évidence la corrélation des événements d'un même SPAD entre eux.

Pour toutes les mesures de PDP, de diaphonie et de DCR, la contribution de l'*afterpulsing* est calculée et soustraite du résultat de mesure brut.

4.5.1 Méthode de l'histogramme

Cette méthode utilise le même histogramme de la distribution des délais entre les événements que lors du calcul du DCR (section 4.5.1). Les délais entre les événements est un processus de Poisson et l'histogramme a une distribution exponentielle lorsque les comptes proviennent exclusivement des porteurs thermiques, et c'est généralement le cas pour les délais $>5 \mu\text{s}$. L'*afterpulsing* apparaît sur l'histogramme pour des délais $<1 \mu\text{s}$ par une augmentation des comptes par rapport à la distribution exponentielle attendue.

La méthode consiste donc à faire un lissage exponentiel avec les délais $>5 \mu\text{s}$ où les comptes sont essentiellement causés par des porteurs thermiques. La courbe est ensuite extrapolée aux délais $<5 \mu\text{s}$. La probabilité d'*afterpulsing* se calcule en fonction du délai en évaluant le ratio des comptes excédentaires par rapport au lissage (figure 4.10).

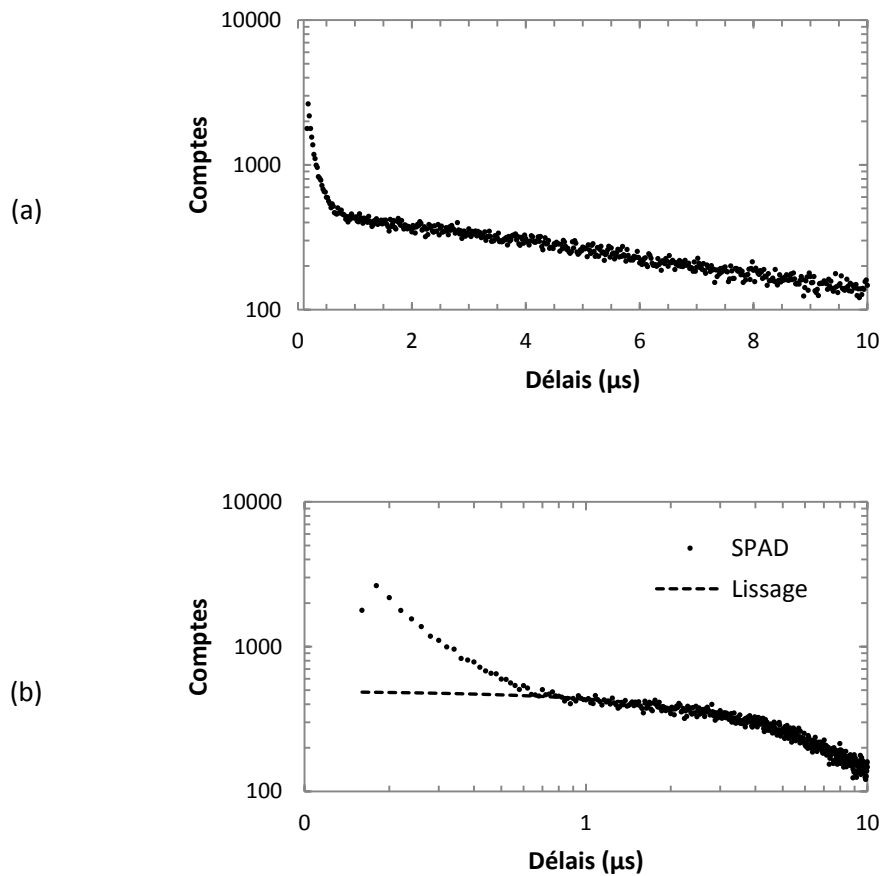


Figure 4.10 Histogramme des comptes en fonction du délai montrant l'effet d'*afterpulsing* à moins de 1 μs de délais avec une échelle (a) linéaire sur l'axe des x pour montrer la distribution exponentielle et (b) logarithmique sur l'axe des x pour mettre l'accent sur le lissage.

Limitation de la méthode

L'allure de la distribution exponentielle dépend de plusieurs paramètres comme le DCR, la température et la tension excédentaire appliquée sur le SPAD. De plus, la précision de l'*afterpulsing* calculée avec cette méthode dépend fortement de l'algorithme de lissage. Pour être reproductible, cette méthode devrait idéalement se faire de façon automatique avec un système embarqué et un algorithme flexible permettant de faire un lissage reproductible malgré la variabilité des paramètres de DCR, température et tension excédentaire.

4.5.2 Méthode de l'autocorrélation

La mesure d'*afterpulsing* par autocorrélation consiste à enregistrer le signal de sortie d'un SPAD de 20 ms de 5×10^6 échantillons M à raison d'un pas τ de 4 ns mesuré à l'aide d'un oscilloscope rapide (LeCroy SDA6000a). Ensuite, la fonction d'autocorrélation (G) se calcule par [100] :

$$G(\kappa\tau) = \frac{1}{M\bar{n}^2} \sum_{i=1}^M N(i\tau)N(i\tau + \kappa\tau) \begin{cases} \text{Pour} \\ k = 1000 \\ \tau = 4 \text{ ns} \end{cases} \quad \text{Éq. 4.9}$$

où M est le nombre total d'échantillons constituant le signal mesuré, N est le nombre de comptes, \bar{n} est le taux de comptage moyen par échantillon et κ est le canal de corrélation de 4 μ s (1000 échantillons \times 4 ns).

La probabilité d'*afterpulsing* p à interval $\kappa\tau$ se calcule par [100]:

$$p = (G(\kappa\tau) - 1)\bar{n} \quad \text{Éq. 4.10}$$

Limitation de la méthode

Le résultat de cette méthode devrait être identique à la méthode de l'histogramme. Par contre, cette méthode nécessite un traitement beaucoup plus lourd de l'information (calcul de la fonction d'autocorrélation) comparativement à la méthode de lissage (lissage exponentiel). Pour cette raison, cette méthode n'est pas utilisée dans le cadre de ce projet.

Pour plus d'efficacité, un système embarqué sur FPGA pourrait être utilisé afin de calculer en temps réel l'autocorrélation.

4.5.3 Comparaison entre les SPAD conçus

Le SPAD S du premier prototype ne montre pas d'*afterpulsing* puisque le temps de recharge est très long dû à la forte capacité parasite de la résistance d'étouffement externe à la puce.

Pour le deuxième prototype, l'*afterpulsing* (évalué par la méthode de l'histogramme) est d'abord mesuré sur différents SPAD en fonction de V_E (figure 4.11). À $V_E = 4$ V, la figure montre une probabilité de 4,2 % pour un SPAD à anneau de garde virtuel de 121 μm^2 de surface photosensible et 8,0 % pour

un SPAD à anneau de garde à diffusion de $130 \mu\text{m}^2$ de surface photosensible. À $V_E = 2,5 \text{ V}$ un SPAD à anneau de garde à diffusion de $1182 \mu\text{m}^2$ de surface photosensible présente une probabilité d'*afterpulsing* de 9,1 %. Le DCR élevé de ce SPAD empêche de caractériser l'*afterpulsing* à plus haut V_E car la sortie du SPAD sature. La figure démontre une corrélation entre la dimension des SPAD et la probabilité d'*afterpulsing*. Ce comportement s'explique par la plus grande capacité de jonction du SPAD de plus grande surface, augmentant le courant d'avalanche et la probabilité d'*afterpulsing*. De plus, le SPAD à anneau de garde virtuel a près de deux fois moins de probabilité d'*afterpulsing* que son homologue de dimension similaire à anneau de garde à diffusion causée par sa plus grande capacité de jonction.

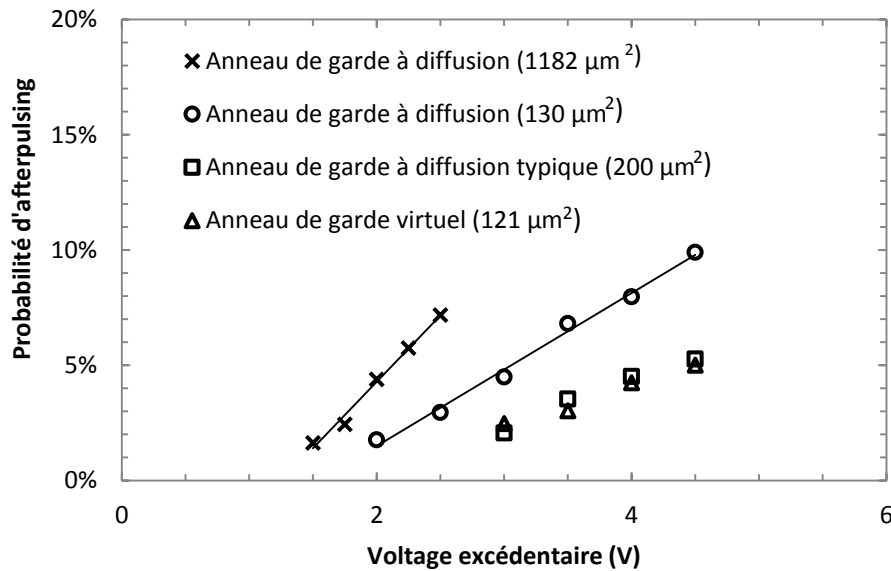


Figure 4.11 Probabilité d'*afterpulsing* en fonction de la tension excédentaire pour 4 SPAD du deuxième prototype; SPAD à anneau de garde à diffusion avec une surface photosensible de 1182 (SPAD 0, matrice 9 de la puce B), 200 (SPAD 2, matrice 1 de la puce B) et $130 \mu\text{m}^2$ (SPAD 1, matrice 6 de la puce B) ainsi qu'un SPAD à anneau de garde virtuel de $121 \mu\text{m}^2$ (SPAD 1, matrice 7 de la puce B) de surface photosensible.

4.5.4 Effet de la température et du temps mort

La figure 4.12 présente l'*afterpulsing* en fonction de la température et du temps mort sur un SPAD à anneau de garde à diffusion intégrée en matrice 3×3 de la puce D. La probabilité d'*afterpulsing* augmente en abaissant la température et en diminuant le temps mort. Durant son temps mort, un

SPAD est non-photosensible, c'est pourquoi une augmentation du temps mort, diminue la photosensibilité du SPAD. Le temps mort doit être ajusté afin d'avoir le meilleur compromis entre la photosensibilité et la probabilité d'*afterpulsing*.

La figure 4.16 montre également que la température d'opération d'un SPAD doit être ajustée afin de faire un compromis entre l'*afterpulsing* et le DCR, qui ont deux tendances inverses en fonction de la température. Une température faible diminue la génération de porteurs thermiques et diminue donc le DCR mais augmente le temps de vie des pièges et donc la probabilité d'*afterpulsing*.

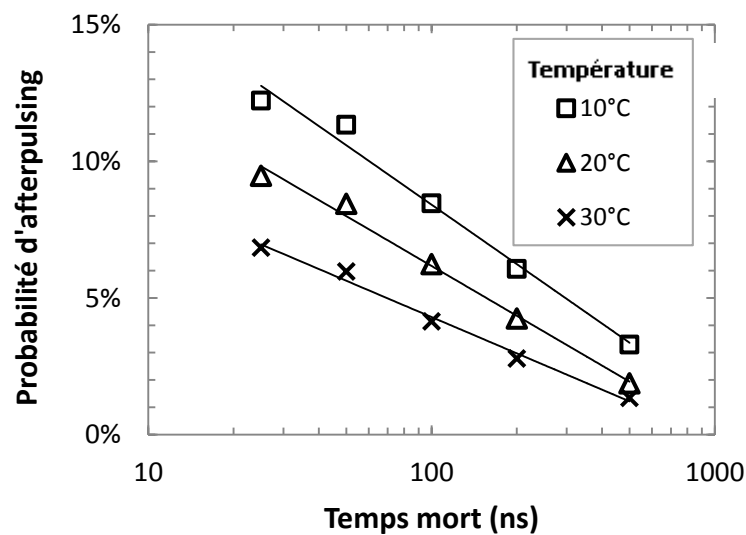


Figure 4.12 Probabilité d'*afterpulsing* du deuxième prototype de la matrice 1 de la puce D en fonction du temps mort à 10, 20 et 30°C à $V_E = 1$ V.

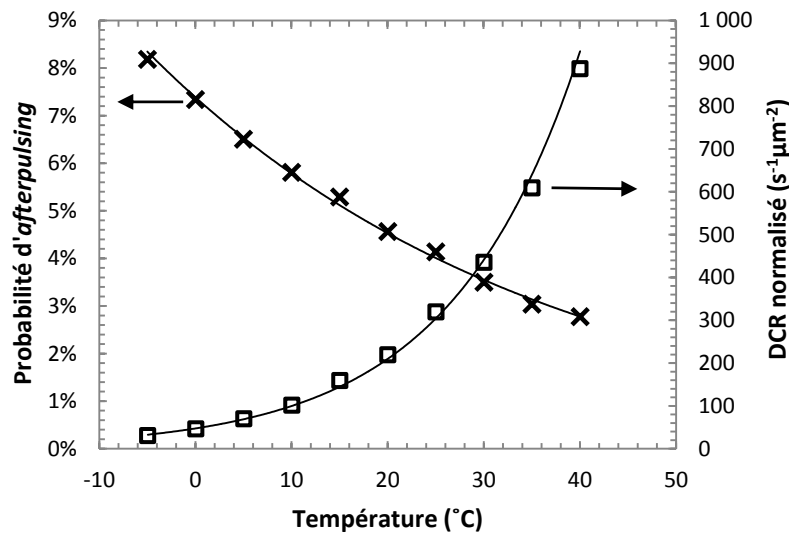


Figure 4.13 Probabilité d'afterpulsing du SPAD 1 de la matrice 6 de la puce B du deuxième prototype en fonction de la température à $V_E = 4$ V et un temps mort de 25 ns.

4.5.5 Indépendance du DCR

La figure 4.14 montre la probabilité d'afterpulsing en fonction de V_E pour deux SPAD de structures identiques, mais ayant un DCR normalisé différent. La figure montre que le SPAD 2 a près de 8 fois plus de DCR que le SPAD 1, mais a une probabilité d'afterpulsing plus faible. À $V_E = 4$ V la probabilité d'afterpulsing du SPAD 1 est 14,3 % tandis que celle du SPAD 2 est 5,8 %.

Ces tendances démontrent qu'un SPAD avec un DCR élevé ne possède pas nécessairement une probabilité d'afterpulsing élevé. Il ne semble donc y avoir aucune dépendance entre le DCR et l'afterpulsing.

Ce comportement semble incohérent pour des SPAD où les principales sources de DCR sont les porteurs générés par la génération-recombinaison par l'intermédiaire de pièges (processus SRH) ainsi que la génération bande à bande assistée de pièges.

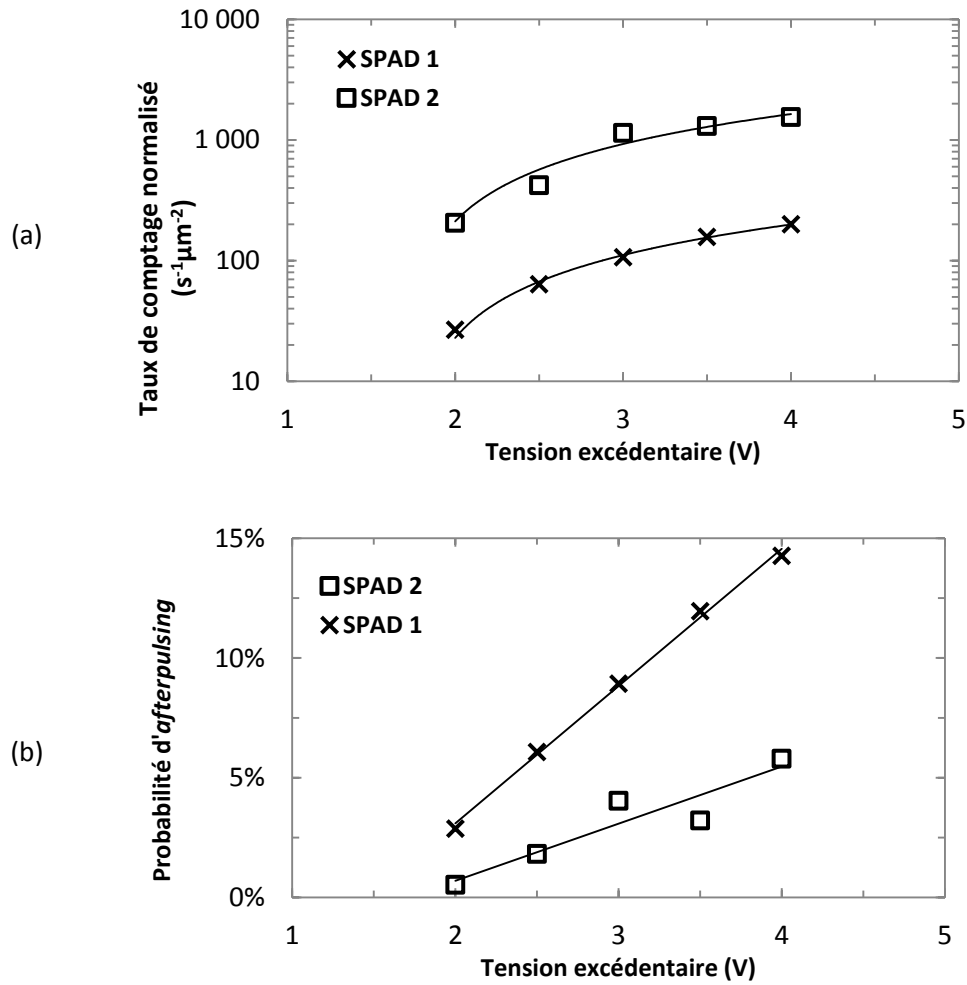


Figure 4.14 (a) DCR normalisé en fonction de la tension excédentaire pour deux SPAD à anneau de garde par diffusion de la matrice 6 ainsi que (b) Probabilité d'afterpulsing en fonction de la tension excédentaire à $T = 25^\circ\text{C}$ et $T_M = 25 \text{ ns}$.

4.5.6 Effet du taux de comptage

La figure 4.15 montre la probabilité d'afterpulsing en fonction de V_E pour un SPAD à anneau de garde à diffusion avec et sans lumière. Il est important de mentionner que la lumière injectée lors de cette expérience est focalisée exclusivement sur le SPAD mesuré.

Tel qu'attendu, en présence de lumière on remarque une augmentation du taux de comptage de $1800 \text{ s}^{-1}\mu\text{m}^{-2}$ à $V_E = 4 \text{ V}$.

Par contre, on remarque également une augmentation de 2 % d'*afterpulsing* en présence de lumière comparativement en noirceur et ce comportement est difficilement explicable.

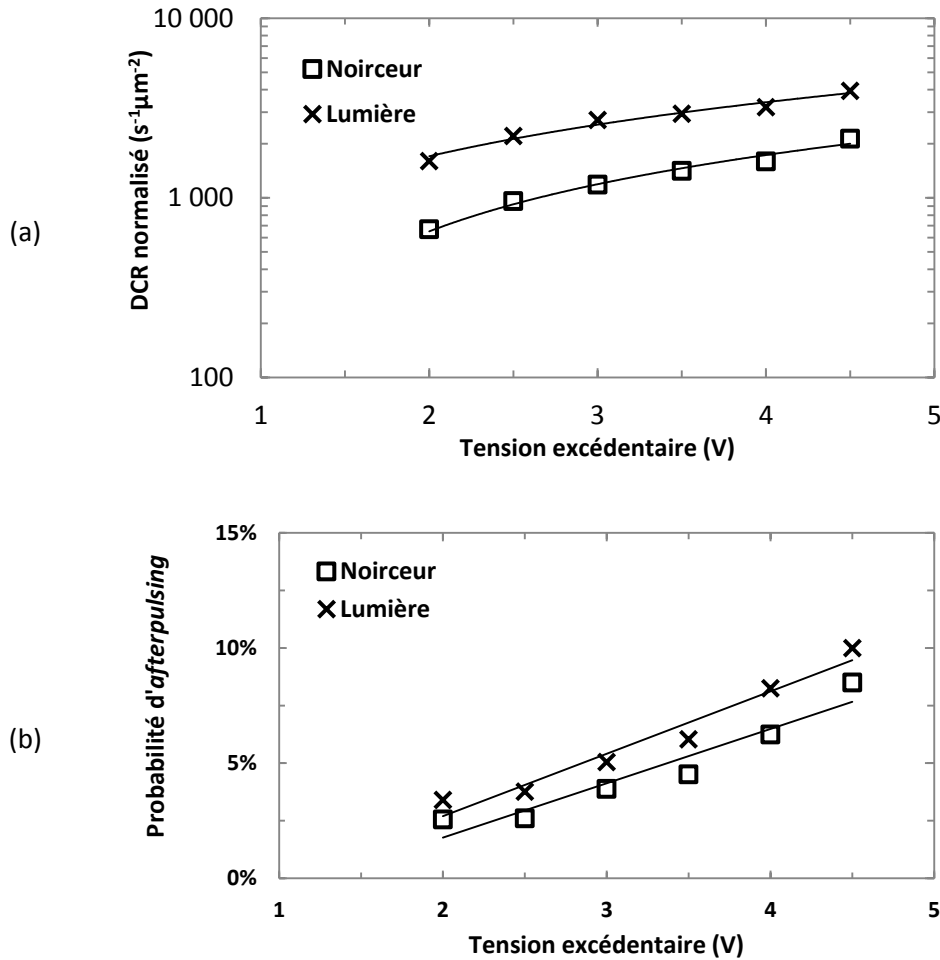


Figure 4.15 (a) DCR normalisé en fonction de la tension excédentaire d'un SPAD à anneau de garde à diffusion ainsi que (b) probabilité d'*afterpulsing* en fonction de la tension excédentaire à $T = 25^{\circ}C$ et $T_M = 100$ ns pour le même SPAD de la matrice 6 de la puce B du deuxième prototype en noirceur et éclairé par un faisceau focalisé.

4.6 Mesure de la diaphonie

Quatre méthodes sont décrites pour caractériser la diaphonie : la méthode des évènements simultanés, du faisceau focalisé, de l'histogramme et de la corrélation croisée. On retrouve des méthodes similaires dans la littérature [85].

4.6.1 Méthode des évènements simultanés

Cette méthode couramment utilisée dans la littérature se base sur la mesure du taux d'occurrence d'un signal de corrélation généré lorsque deux évènements provenant d'un SPAD (SPAD_A) et de son voisin (SPAD_B) surviennent en même temps. Les évènements mesurés E se déterminent alors par le nombre de déclenchements du SPAD_A et SPAD_B dans une même fenêtre de temps Δ_T , fixée ici à 4 ns. Le nombre d'évènements mesurés inclut des évènements corrélés E_C et des évènements purement aléatoires et non-corrélés nommés E_{NC} . Le nombre d'évènements simultanés mesurés s'exprime comme [79] :

$$E = E_C + E_{NC} \quad \text{Éq. 4.11}$$

Les évènements non-corrélés se calculent par :

$$E_{NC} = \frac{N_A N_B \Delta_T}{T} \quad \text{Éq. 4.12}$$

où N_A et N_B sont respectivement les nombres d'évènements survenus sur les SPAD_A et SPAD_B et T est la durée de la mesure [79]. E_{NC} correspond à la probabilité que deux évènements surviennent dans la même fenêtre de temps totalement aléatoirement.

Ainsi, la probabilité de diaphonie optique (P_C) se détermine par [79] :

$$P_C = \frac{E_C}{N_A + N_B - E_C} \quad \text{Éq. 4.13}$$

Limitations de la méthode

Cette méthode est simple, mais peut s'avérer fastidieuse et longue à réaliser si la probabilité de diaphonie est faible.

De plus, cette méthode inclut seulement les évènements quasi instantanés, donc les photons émis par rayonnement Bremsstrahlung absorbés dans la région de multiplication du SPAD voisin. La méthode exclut donc les évènements retardés de plusieurs dizaines de nanosecondes pouvant provenir de diaphonie électrique.

4.6.2 Méthode du faisceau focalisé

Cette méthode consiste à focaliser un faisceau de lumière exclusivement sur un SPAD (SPAD_A) et à observer l'augmentation du taux de comptages sur son voisin (SPAD_B). Puisque les SPAD sont très sensibles aux photons peuvent diffuser ou être réfléchis sur le SPAD voisin, une couche de métallisation couvre le SPAD_B afin de limiter l'absorption de photons. Pour la mesure, on suppose que l'absorption de photons par le SPAD_B provenant du faisceau focalisé est nulle.

La probabilité de diaphonie se décrit par :

$$P_C = \frac{E_{B\text{-Lumière}} - E_{B\text{-Noir}}}{E_{A\text{-Lumière}} - E_{A\text{-Noir}}} \quad \text{Éq. 4.14}$$

où, $E_{A\text{-Lumière}}$ et $E_{B\text{-Lumière}}$ sont les taux de comptages des SPAD_A et SPAD_B lorsque le SPAD_A est illuminé. $E_{A\text{-Noir}}$ et $E_{B\text{-Noir}}$ sont les taux de comptages de SPAD_A et SPAD_B lorsque les deux SPAD sont en noirceur.

Limitations de la méthode

Cette méthode offre une grande précision même à faible taux de comptage puisque l'on peut aisément acquérir les données sur plusieurs minutes. Pour s'affranchir d'une potentielle dérive en température causée par le long temps d'acquisition, le faisceau peut être pulsé.

Par contre, la méthode nécessite un alignement du faisceau sur un SPAD pouvant s'avérer particulièrement ardu, voire impossible si le SPAD a une petite surface. Pour s'affranchir de l'alignement d'un faisceau de lumière, les deux SPAD doivent pouvoir s'allumer et s'éteindre indépendamment. La méthode s'utiliserait alors sans faisceau focalisé, simplement en activant ou désactivant le SPAD_A et en mesurant le taux de comptage du SPAD_B [85].

4.6.3 Méthode de l'histogramme

La méthode de l'histogramme consiste à compiler les délais entre les événements d'un SPAD de référence et de son voisin. La distribution des délais est un processus de Poisson dans le cas où aucun

évènement n'est corrélé et apparaît comme une exponentielle²⁶. Dans le cas où de la diaphonie est présente entre les deux SPAD mesurés dans les premières 100 ns, on observe une augmentation du taux de comptages par rapport à l'allure exponentielle attendue.

Le lissage est fait sur l'histogramme avec les évènements >1 μ s, où aucune corrélation n'est attendue. Les évènements corrélés apparaissent comme une augmentation par rapport au lissage, semblable à la méthode de l'histogramme pour l'*afterpulsing* (section 4.5.1).

Limitations de la méthode

Cette méthode présente l'avantage de montrer la distribution dans le temps de la diaphonie et permet d'apprécier la diaphonie instantanée provenant de radiation Bremsstrahlung ainsi que la diaphonie retardée dans le temps, provenant entre autres de la diaphonie électrique à la recharge.

4.6.4 Corrélation croisée

Cette méthode consiste à calculer les corrélations croisées sur le signal de sortie d'un SPAD (SPAD_A) et de son voisin (SPAD_B) pour évaluer la distribution en fonction du temps. Les signaux de sortie des SPAD durent 20 ms et contiennent 5×10^6 échantillons M à raison d'un pas τ de 4 ns. Ces signaux sont mesurés à l'aide d'un oscilloscope rapide (LeCroy SDA6000a). La fonction de corrélation croisée C est basé sur la fonction d'autocorrélation utilisée pour déterminer l'*afterpulsing* [100] et se définit par :

$$C(\kappa\tau) = \frac{1}{M\bar{n}_A\bar{n}_B} \sum_{i=1}^M N_A(i\tau)N_B(i\tau + \kappa\tau) \begin{cases} \text{Pour} \\ k = 600 \\ \tau = 4 \text{ ns} \end{cases} \quad \text{Éq. 4.15}$$

où M est le nombre total d'échantillons d'un signal et doit être le même pour le signal du SPAD_A et SPAD_B. N_A et N_B sont les nombres de comptes, \bar{n}_A et \bar{n}_B sont les taux de comptage moyens rapportés pour un échantillon, τ est le pas en temps et κ le canal de corrélation.

²⁶ L'allure exponentielle de l'histogramme théorique se confirme en mesurant les délais des évènements de deux SPAD éloignés de plusieurs centaines de microns pour lesquels aucune corrélation entre les évènements n'est attendue.

De cette façon la probabilité d'avoir deux évènements corrélés à tout instant $\kappa\tau$ se définit par :

$$P(0|\kappa\tau) = (C(\kappa\tau) - 1)\bar{n} \quad \text{Éq. 4.16}$$

Limitations de la méthode

Cette mesure doit se faire en post-traitement et nécessite un volume important de données. Pour cette raison, cette méthode n'est pas utilisée dans le cadre de ce projet.

4.6.5 Résumé des méthodes de caractérisation

De la diaphonie électrique à la recharge se mesure sur certaines paires de SPAD utilisant une isolation à puits p et aucune isolation (section 4.6.7). Pour cette raison, les méthodes de caractérisation permettant de mesurer la diaphonie électrique à la recharge sont préconisées. Les spécificités des principales méthodes de caractérisation sont résumées au tableau 4.4. La méthode de l'histogramme est préconisée parce qu'elle permet de distinguer les deux sources de diaphonie. De plus, elle est simple à mettre en œuvre.

Tableau 4.4 Tableau résumant les méthodes de caractérisation de la diaphonie et leurs capacités à mesurer et distinguer la diaphonie électrique à la recharge de la diaphonie optique.

Méthode	Mesure de diaphonie instantanée	Mesure de diaphonie électrique à la recharge	Distingue la diaphonie électrique et optique
Évènement simultané	Oui	Non	Non
Faisceau focalisé	Oui	Oui	Non
Corrélation croisée	Oui	Oui	Oui
Histogramme	Oui	Oui	Oui

4.6.6 Diaphonie sur une matrice 3×3

Deux types de diaphonie sont mesurées sur la matrice 3×3 de la puce D du deuxième prototype : la diaphonie directe et la diaphonie en diagonale, comme il est montré à la figure 4.16.

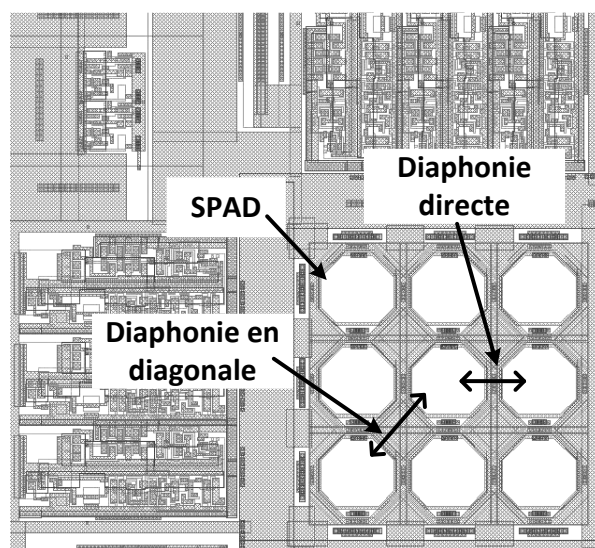


Figure 4.16 Schéma de masque de la matrice 0 de la puce D du deuxième prototype montrant la diaphonie directe et en diagonale.

4.6.7 Comparaison du type d'isolations de SPAD

Trois types d'isolation sont développés et caractérisés dans le deuxième prototype, l'isolation à puits p et à puits n ainsi que l'absence d'isolation (section 3.3.1).

Isolation à puits p

La figure 4.17 (a) montre la diaphonie directe et en diagonale d'une matrice de 3×3 SPAD avec une isolation à puits p . La diaphonie totale pour les deux paires de SPAD²⁷ atteint 15 % à $V_E = 4$ V. La figure 4.17 (b) montre l'histogramme des délais entre les événements pour les deux paires de SPAD. La figure montre que dans le cas de la diaphonie directe, il y a un maximum de diaphonie dans les 20 premières nanosecondes ce qui n'est pas le cas pour la diaphonie en diagonale. Ce maximum représente la diaphonie optique instantanée et la diaphonie à plus de 50 ns provient de la diaphonie électrique à la recharge du SPAD et probablement de nature électrique²⁸.

²⁷ La diaphonie totale inclut la diaphonie instantanée et la diaphonie électrique à la recharge.

²⁸ Il semble improbable que le maximum de diaphonie survenant à la recharge soit causé par de l'*afterpulsing* suivie d'une diaphonie puisque l'oscilloscope ne tient pas compte de ces événements dans l'acquisition de l'histogramme. De plus, la probabilité que de tels événements surviennent est faible.

Les deux paires de SPAD montrent de la diaphonie électrique à la recharge. La paire de SPAD en diagonale montre très peu de diaphonie instantanée contrairement à la paire de SPAD en direct. Puisque les deux paires de SPAD possèdent la même diaphonie totale de 15 %, il semble évident que le principal mécanisme de diaphonie est électrique.

Un SPAD de grande surface a une plus grande capacité de jonction, un courant d'avalanche plus important et devrait présenter également plus de diaphonie. La dimension du SPAD devrait donc jouer un rôle important pour la diaphonie, mais aucune structure fonctionnelle dans les prototypes 1 et 2 ne permet la caractérisation de la diaphonie en fonction de la dimension. De plus, aucune structure fonctionnelle ne permet la caractérisation de la diaphonie des SPAD avec isolation à puits p en fonction de l'espace mort.

La diaphonie a été mesurée sur une paire de SPAD de la matrice 9 de la puce B similaire aux SPAD de la figure 4.17, mais intégrés en paires plutôt qu'en matrice 3×3 .

Ces SPAD intégrés en paire présentent une probabilité de diaphonie de 6,6 % pour une surface active par SPAD de $1182 \mu\text{m}^2$ à $V_E = 4 \text{ V}$ avec un espace mort de $9,5 \mu\text{m}$. Des SPAD similaires ont une probabilité de diaphonie de 16 % avec les mêmes conditions lorsqu'ils sont intégrés en matrice 3×3 . Ces résultats semblent donc démontrer que l'intégration en matrice de plus de 2 SPAD augmente la probabilité de diaphonie.

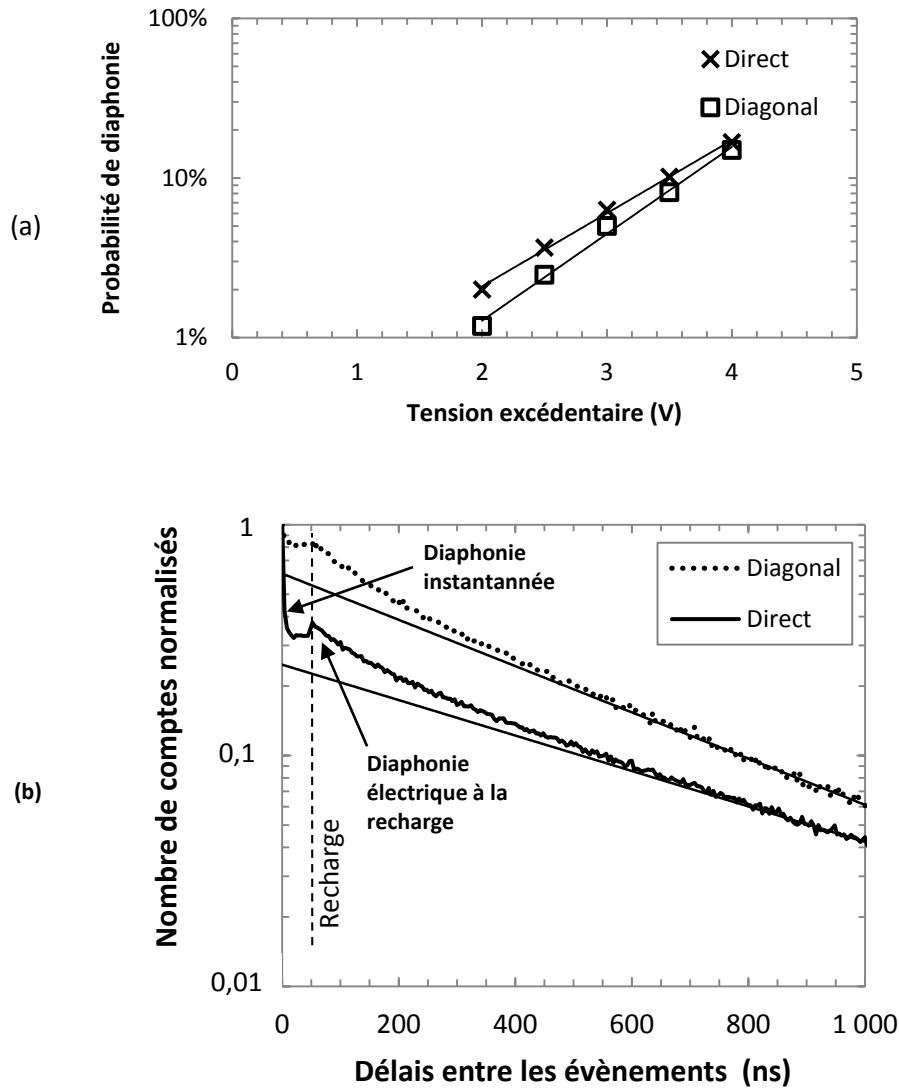


Figure 4.17 (a) Probabilité de diaphonie totale pour une paire de SPAD direct et une paire de SPAD en diagonale intégrée dans une matrice 3×3 sur la puce D du prototype 2 et utilisant une isolation de puits p avec un espace mort de $8 \mu\text{m}$ et $T_M = 50 \text{ ns}$ à 25°C mesurées avec la méthode de l'histogramme ainsi que (b) histogramme et lissage sur $10 \mu\text{s}$ correspondant à la distribution dans le temps des délais entre les événements de chaque paire de SPAD.

Intégration sans isolation

La figure 4.18 montre la probabilité de diaphonie en fonction de la tension excédentaire pour la matrice 3 de la puce B, c'est-à-dire 3 paires de SPAD de $207 \mu\text{m}^2$ sans isolation (figure 3.17 (a)). Les résultats montrent une probabilité de diaphonie instantanée de 6 % pour un SPAD avec un espace mort de $5,5 \mu\text{m}$ et $V_E = 4 \text{ V}$.

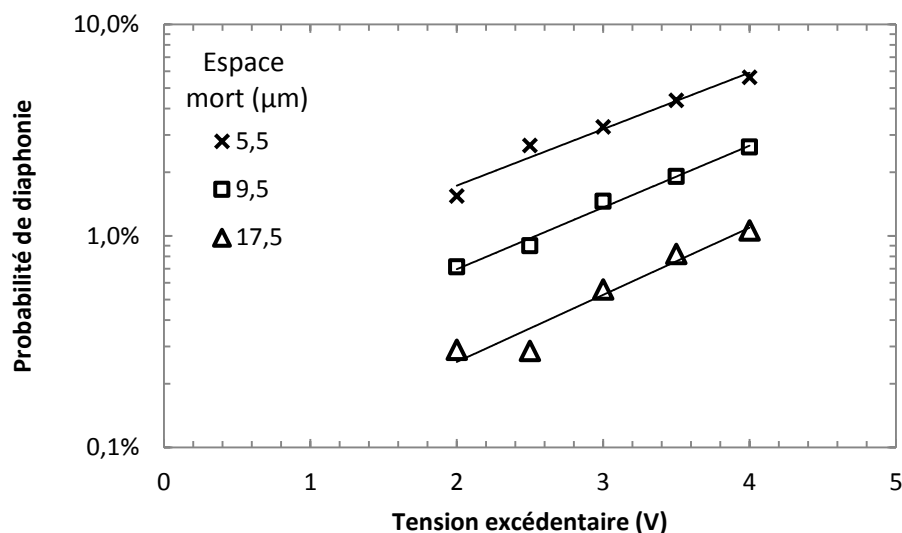


Figure 4.18 Probabilité de diaphonie directe mesurée par la méthode de l'histogramme pour les 3 paires de SPAD de $207 \mu\text{m}^2$ (matrice 3 de la puce B) sans isolation avec 5,5, 9,5 et 17,5 μm d'espace mort et $T_M = 25 \text{ ns}$ à 25°C .

Isolation à puits n

Les résultats de diaphonie provenant de paires de SPAD possédant une isolation à puits n montrent une diaphonie directe de 0,6 % pour un espace mort de $27 \mu\text{m}$ lorsque les SPAD sont opérés à $V_E = 4 \text{ V}$. La mesure a été prise avec la méthode du faisceau focalisé, bien adaptée pour les faibles taux de diaphonie. La méthode de l'histogramme permet de déterminer que cette méthode d'isolation montre exclusivement de la diaphonie instantanée (figure 4.19 (b)).

L'isolation à puits n est sans doute l'intégration permettant la plus faible probabilité de diaphonie. Par contre, cette isolation engendre un espace mort important causé par la grande constante de diffusion du puits n limitant de façon significative la densité d'intégration de SPAD en matrice.

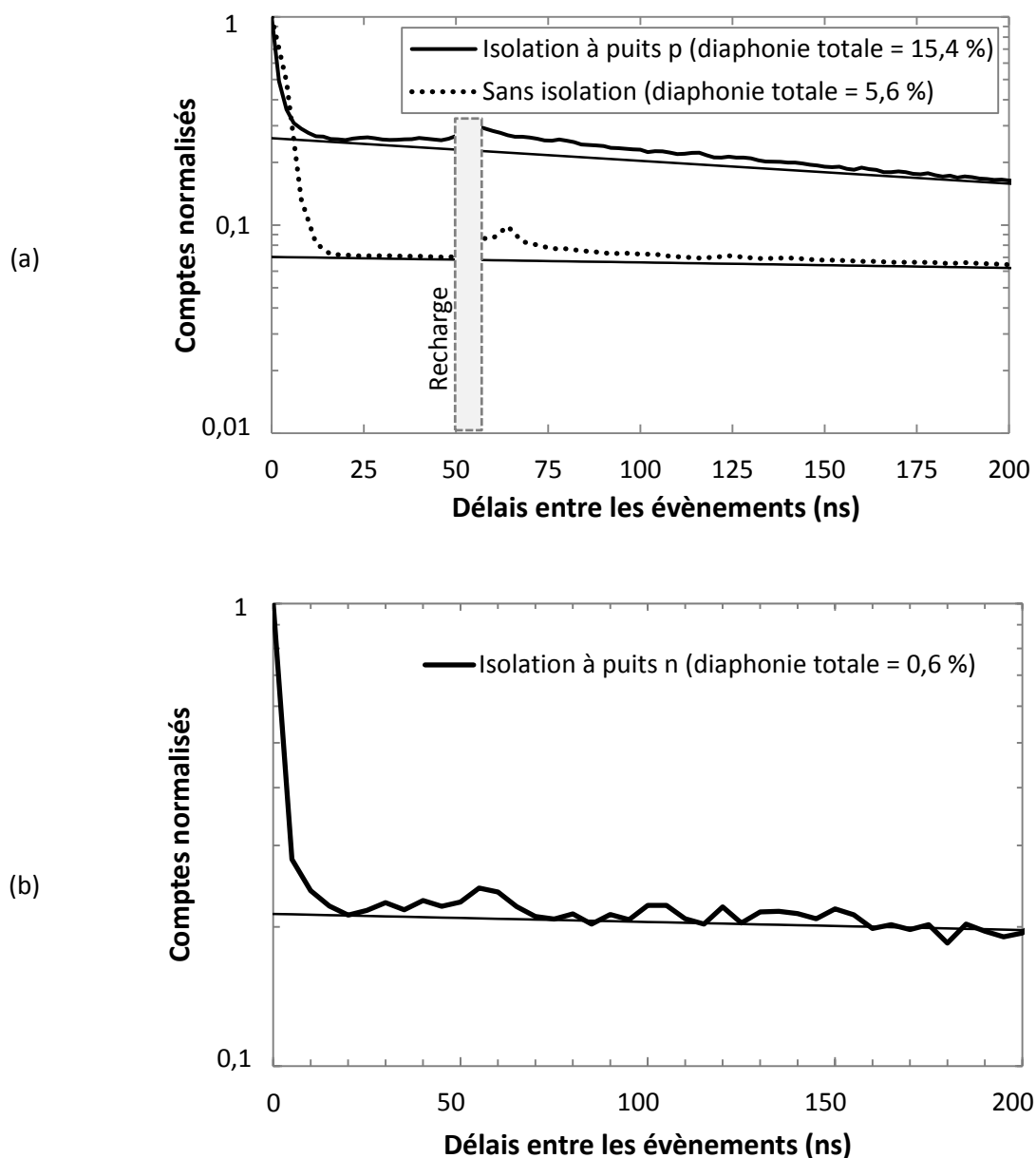


Figure 4.19 Histogramme des délais entre les évènements de (a) une paire de SPAD sans isolation ($5,5 \mu\text{m}$ d'espace mort et $200 \mu\text{m}^2$ d'aire) et une paire de SPAD avec isolation à puits p ($8 \mu\text{m}$ d'espace mort et $1800 \mu\text{m}^2$ d'aire) montrant le lissage et le moment de la recharge à $V_E = 4 \text{ V}$ et $T_M = 50 \text{ ns}$ et 25°C et (b) une paire de SPAD avec une isolation à puits n dans les mêmes conditions.

Autre discussion

Aucune structure n'est disponible pour évaluer la diaphonie en fonction de la surface active du SPAD. Cette étude permettrait une meilleure comparaison des méthodes d'isolation.

La figure 4.19 (a) montre l'histogramme des délais avec lissage exponentiel pour une paire de SPAD avec une isolation à puits p de $1800 \mu\text{m}^2$ de surface active et une paire de SPAD sans isolation avec une surface active de $200 \mu\text{m}^2$, toutes deux opérées à $V_E = 4\text{V}$ avec un temps mort de 50 ns et une recharge d'environ 10 ns. On remarque que les deux paires de SPAD présentent de la diaphonie instantanée causée par le rayonnement Bremsstrahlung ainsi que de la diaphonie électrique à la recharge.

La figure 4.19 (b) montre l'histogramme des délais pour une paire de SPAD avec une isolation à puits n . Comme il est montré sur la figure, l'isolation à puits n présente une diaphonie totale de 0,6 % et aucune diaphonie à la recharge.

La figure montre que la paire avec une isolation à puits p possède une plus grande probabilité de diaphonie totale. Par contre, la probabilité de diaphonie instantanée, mesurée dans les premières dizaines de nanosecondes et principalement causée par l'émission de photons par rayonnement Bremsstrahlung, est plus faible. On observe ce comportement en évaluant le ratio entre le maximum de l'histogramme par rapport au niveau du lissage de courbe.

La figure 4.20 illustre schématiquement les mêmes paires de SPAD que la figure précédente avec l'angle de photoémission par rayonnement Bremsstrahlung moyen estimé en négligeant l'épaisseur de la région active du SPAD ainsi que la surface de l'avalanche soutenue. On remarque que l'angle de la paire de SPAD isolée avec un puits p est plus faible, réduisant ainsi la densité de photons Bremsstrahlung atteignant le SPAD voisin. De plus, puisque l'absorption de photons dans le silicium obéit à une décroissance exponentielle, une plus grande distance entre l'émission des photons et la région active réduit la probabilité de diaphonie causée par le rayonnement Bremsstrahlung. Cette analyse confirme le comportement observé à la figure 4.19.

La paire de SPAD isolée par un puits p présente cependant une probabilité de diaphonie totale plus élevée que son homologue sans isolation. Ceci est probablement causé par la plus grande diaphonie électrique observée à la recharge.

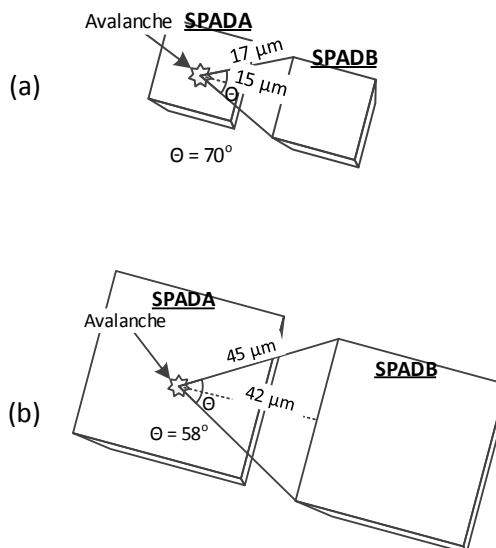


Figure 4.20 Modélisation de l'angle de photoémission par radiation Bremsstrahlung pour (a) une paire de SPAD sans isolation (5,5 µm d'espace mort et 200 µm² d'aire) et (b) une paire de SPAD avec isolation à puits p (8 µm d'espace mort et 1800 µm² d'aire).

4.6.8 Comparaison des méthodes de mesures

La figure 4.21 montre la probabilité de diaphonie en fonction de la tension excédentaire pour une paire de SPAD sans isolation avec un espace mort de 9,5 µm utilisant la méthode de l'histogramme, la méthode des événements simultanés et la méthode du faisceau focalisé.

La figure montre que la méthode de lissage estime la diaphonie à un niveau plus élevé comparativement à la méthode du faisceau focalisé. La méthode de lissage nécessite un post-traitement de l'information. Le résultat obtenu par cette méthode dépend fortement du lissage. Cette caractéristique permet d'expliquer la divergence des résultats entre les deux méthodes.

La figure démontre également que la méthode des événements simultanés estime une probabilité de diaphonie moins importante que la méthode du faisceau focalisé. Ces résultats semblent démontrer que la méthode du faisceau focalisé inclut la mesure la diaphonie électrique à la recharge, ce qui n'est pas le cas de la méthode des événements simultanés.

Cette hypothèse se confirme également avec la figure 4.19 montrant la distribution de la diaphonie d'une paire de SPAD sans isolation et avec un espace mort de $9,5\ \mu\text{m}$. Cette figure démontre bel et bien de la diaphonie électrique à la recharge. Ceci explique pourquoi la méthode du faisceau focalisé mesure une diaphonie plus élevée que la méthode des événements simultanés.

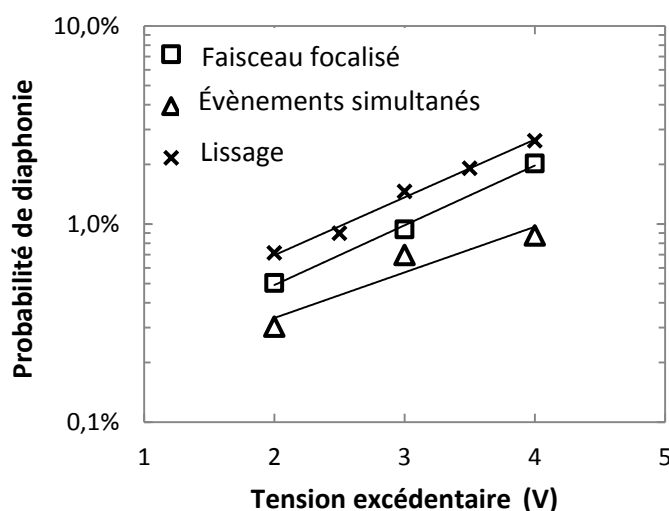


Figure 4.21 Comparaison de la probabilité de diaphonie directe pour une paire de SPAD sans isolation avec $9,5\ \mu\text{m}$ d'espace mort et $T_M = 25\ \text{ns}$ à 25°C (matrice 3 de la puce B) mesurée avec la méthode des événements simultanés, de lissage et du faisceau focalisé.

4.7 Mesure de probabilité de photodétection

Les SPAD sont avant tout des détecteurs de photons et la probabilité de photodétection (PDP) permet d'apprécier leur photosensibilité.

Deux méthodes de caractérisation de la PDP sont présentées. La première méthode utilise un faisceau focalisé et est utilisée dans ce projet. La seconde méthode utilise une sphère intégratrice, mais n'a pas été utilisée.

4.7.1 Méthode par faisceau focalisé

La méthode utilisée dans ce projet pour mesurer la PDP utilise un faisceau calibré et focalisé. Le montage utilisé pour la mesure est présenté à la figure 4.22. La source de lumière utilisée est une diode électroluminescente (DEL) à large spectre. Le montage utilise un filtre à cristaux liquides ajustables *Varispec* à 20 nm de largeur de bande pouvant balayer une plage de 440 à 700 nm. Un trou de 30 μm de diamètre est utilisé pour obtenir un faisceau de lumière de 30 μm , focalisé à l'aide d'un objectif Mitsutoyo 10 \times avec une longue distance de travail permettant d'obtenir un faisceau focalisé d'environ 7 μm de diamètre sur le SPAD. La source à DEL, le filtre accordable en longueur d'onde ainsi que le sténopé sont assemblés dans un tube et forment un bras pouvant se déplacer à l'aide d'un plateau mobile à 2 axes permettant de déplacer le faisceau dans le champ de vue de l'objectif. Une caméra CMOS et un cube séparateur sont utilisés afin de visualiser le faisceau lors de l'alignement sur un SPAD. Les filtres à densité neutre, la caméra CMOS, le cube séparateur et l'objectif 10 \times sont assemblés dans un même bloc (tête).

Un plateau mobile permet le déplacement du porte-échantillon dans les 3 axes. Ceci permet de placer l'échantillon au foyer de la caméra et de placer le faisceau lumineux à l'endroit désiré sur l'échantillon. De plus, le faisceau de lumière est focalisé sur l'échantillon à l'aide d'un plateau mobile fixé au bras contenant la DEL, le filtre accordable et le sténopé. Pour des déplacements plus fins, les plateaux mobiles utilisent des moteurs piézoélectriques.

Une diode de référence calibrée NIST (*National Institute of Standards and Technology*) ainsi qu'un puissance-mètre Newport 1830c permettent de mesurer la puissance du faisceau focalisé en fonction de la longueur d'onde. La première étape consiste à calibrer le faisceau lumineux ainsi que les filtres à densité neutre (1 dB, 2 dB et 3 dB) en fonction de la longueur d'onde à l'aide de cette diode de référence. Pour y arriver, la puissance du faisceau est mesurée à chaque longueur d'onde avec et sans filtre. La calibration de la DEL est faite avant chaque mesure de PDP (à chaque jour) permettant d'assurer la reproductibilité des résultats. La calibration des filtres à densité neutre devrait se faire si le montage subit un changement.

La seconde étape consiste à remplacer la diode de référence par un SPAD. Ensuite, un filtre à densité neutre est choisi pour chaque longueur d'onde et point d'opération afin d'avoir un taux de comptage adéquat sur le SPAD. Le taux de comptage adéquat se situe entre environ 10 000 s^{-1} et la moitié du taux de comptage maximum, déterminés par le temps mort du circuit d'étouffement. Pour éviter au

maximum le chauffage local et assurer la reproductibilité des mesures, il ne faut pas dépasser $1 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$. De cette façon, la PDP à une longueur d'onde λ se calcule par :

$$PDE(\lambda) = \frac{C(\lambda) - DCR}{P(\lambda)\lambda/hc} \quad \text{Éq. 4.17}$$

où $C(\lambda)$ est le taux de comptage du SPAD éclairé à la longueur d'onde λ , $P(\lambda)$ est la puissance en watt du faisceau à la longueur d'onde λ , h est la constante de Planck et c la vitesse de la lumière.

Pour assurer la reproductibilité des mesures, la DEL ainsi que tous les équipements sont allumés au moins 1 heure avant utilisation. De plus, la diode de référence doit toujours être gardée à la noirceur pour éviter une dérive des mesures. Il faut également s'assurer de prendre les mesures momentanément, pendant quelques secondes. Il faut éviter les mesures sur une longue échelle de temps (plusieurs minutes) pendant laquelle le signal de sortie de la diode dérive et fausse le résultat. Entre les mesures, un temps de repos doit être alloué à la diode de référence de plusieurs dizaines de secondes pour éviter une dérive du signal de sortie et assurer d'obtenir des résultats reproductibles.

Limitations du montage

Cette méthode permet la mesure de la PDP de façon localisée sur un SPAD et permet difficilement de mesurer la valeur moyenne de la PDP sur toute sa surface. Par contre, pour un gros SPAD, la surface pourrait être balayée afin de mesurer la distribution de la PDP.

Cette méthode utilise des photons perpendiculaires à la surface du SPAD avec une faible variation de l'angle incident. Pour plusieurs applications comme en TEP, les photons absorbés frappent la surface du SPAD à tout angle. L'utilisateur peut s'attendre à une PDP d'un SPAD utilisé dans ce type d'application plus faible que la PDP mesurée par cette méthode.

Pour une meilleure reproductibilité, un obturateur pourrait être utilisé pour maintenir la DEL ouverte et laisser la diode de référence en place avec l'obturateur fermé pour la garder en noirceur. Aussi, pour plus de stabilité, les mesures pourraient être prises avec plusieurs cycles de quelques secondes avec et sans lumière. Cette méthode permet d'éviter une dérive en température de la diode de référence.

La mise au foyer du faisceau de ce système est limitée mécaniquement par la course du bras, bloquée par le module contenant les filtres à densité neutre. Il est probable qu'une meilleure mise au foyer du faisceau serait possible avec un plus grand degré de liberté dans le déplacement du bras.

Les filtres à densité neutre peuvent difficilement être changés sans modifier l'alignement du faisceau sur l'échantillon. En effet, le module contenant les filtres à densité neutre s'encastrent dans la tête du système. Cette caractéristique a un impact important sur la reproductibilité des résultats, par exemple lorsque plusieurs mesures de PDP sont prises sur un SPAD à différentes longueurs d'onde et que différents filtres à densité neutre sont nécessaires.

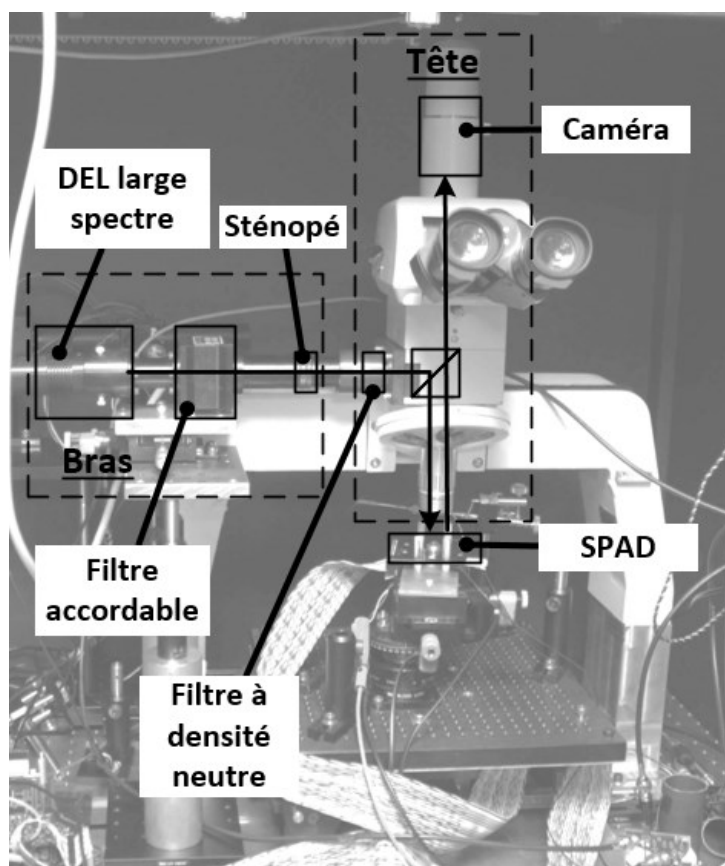


Figure 4.22 Photographie du montage permettant la mesure de la probabilité de photodétection (PDP) par la méthode du faisceau focalisé.

4.7.2 Méthode utilisant une sphère intégratrice

La PDP peut être également mesurée à l'aide d'une sphère intégratrice et un spectromètre tel qu'illustré à la figure 4.23. Dans ce système, le spectromètre s'alimente avec une source lumineuse

large spectre, par exemple une lampe au tungstène. Le spectromètre sélectionne précisément des longueurs d'onde d'intérêt avec une bande passante plus restrictive qu'un filtre accordable. Le faisceau passe ensuite par un obturateur et un filtre à densité neutre calibré.

La première étape consiste à calibrer le faisceau lumineux ainsi que les filtres à densité neutre en fonction de la longueur d'onde à l'aide de la diode de référence. Pour y arriver, la puissance du faisceau est mesurée à chaque longueur d'onde avec et sans filtre.

La seconde étape consiste à ajuster les filtres à densité neutre pour chaque longueur d'onde et point d'opération afin d'avoir un taux de comptage sur le SPAD adéquat de la même façon qu'à la section 4.7.1. Ensuite, le taux de comptage du SPAD doit être mesuré avec et sans lumière. Ainsi, la PDP à une longueur λ se calcul par :

$$PDE(\lambda) = \frac{A_{ref}}{A_{det}} \left(\frac{C(\lambda) - DCR}{P(\lambda)\lambda/hc} \right) \quad \text{Éq. 4.18}$$

où A_{ref} et A_{det} sont la surface de la diode de référence et celle du détecteur à caractériser.

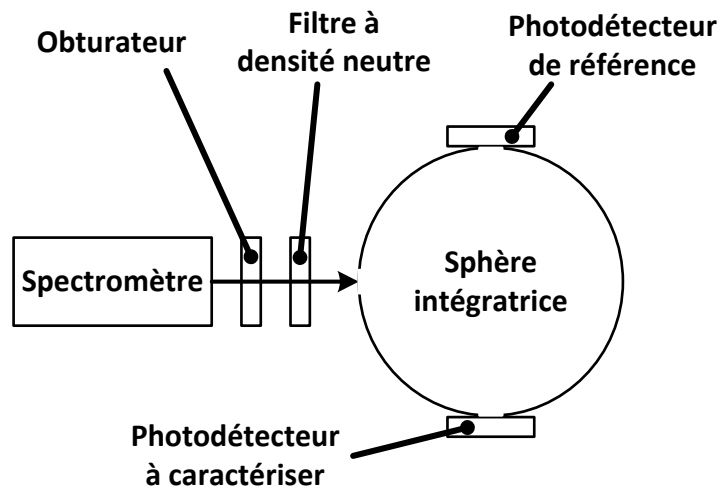


Figure 4.23 Schéma d'un montage permettant la mesure de la probabilité de photodétection (PDP) avec une sphère intégratrice.

4.7.3 Résultats du premier prototype

Des mesures de PDP relatives ont été menées sur le premier prototype et ont servi de preuve de concept pour justifier la réalisation du deuxième prototype. Dans ce cas, la LED bleue utilisée comme source lumineuse n'est pas calibrée. La figure 4.24 montre que le taux de comptage du SPAD S du premier prototype est dépendant de l'intensité lumineuse l'éclairant. Ce comportement confirme la photosensibilité du détecteur.

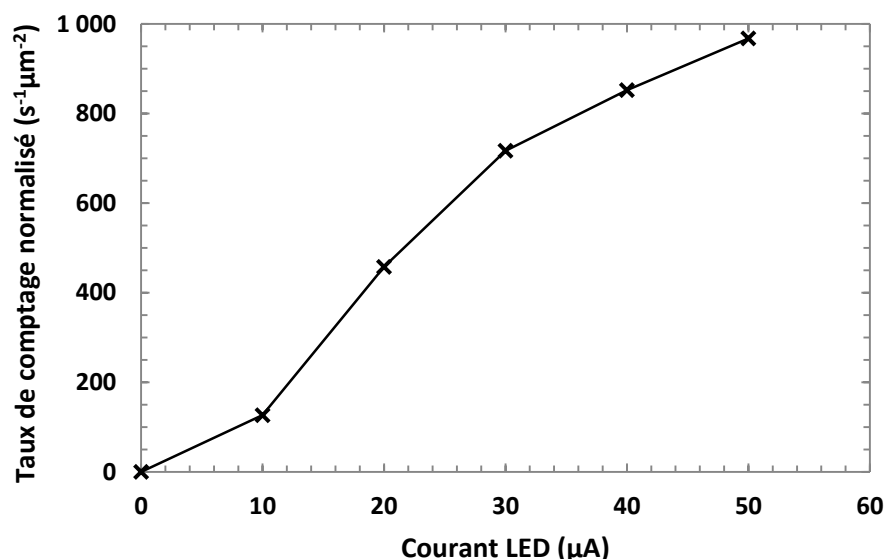


Figure 4.24 Taux de comptage normalisé du SPAD S du premier prototype à $V_E = 1$ V en fonction du courant injecté dans une LED bleue éclairant le SPAD.

4.7.4 Résultats du deuxième prototype

La figure 4.25 montre que le SPAD à anneau de garde à diffusion typique a une PDP au-dessus de 20 % de 2 à 4 V de voltage excédentaire. À $V_E = 2$ V, le SPAD à anneau de garde virtuel a une PDP de 10 %. De plus, la PDP du SPAD avec le diélectrique gravé a une PDP qui n'excède jamais 5 %. Les structures de SPAD sont détaillées à l'annexe B. Ce comportement peut s'expliquer par une détérioration de la surface du SPAD causé par la gravure du diélectrique. Une des explications plausibles expliquant la réduction du PDE est que la détérioration de la surface augmente les réflexions air-diélectrique diminuant la proportion de photons atteignant la région photosensible.

En effet, la figure 4.26(a), montre que la fenêtre d'un SPAD sans gravure du diélectrique semble uniforme. La figure 4.26(b) et (c) montrent un SPAD semblable avec une gravure du diélectrique. On voit que la fenêtre du SPAD ne semble plus uniforme, mais parsemée de défauts. Cette détérioration de la surface du SPAD doit engendrer la détérioration de la PDP.

Le temps mort TM pour la mesure a été fixé à 100 ns afin de minimiser la probabilité d'*afterpulsing*.

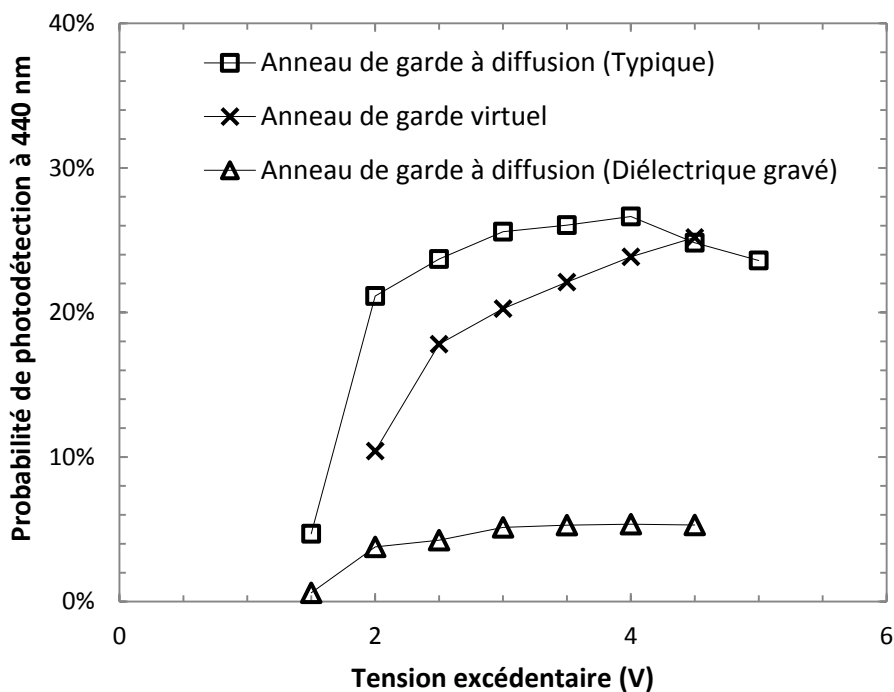


Figure 4.25 PDP à 440 nm en fonction de la tension excédentaire pour un SPAD à anneau de garde à diffusion de $200 \mu\text{m}^2$ de région active avec (SPAD 2, matrice 0 de la puce B) et sans gravure du diélectrique (SPAD 1, matrice 6 de la puce B) ainsi qu'un SPAD à anneau de garde virtuel (SPAD 0, matrice 7 de la puce B) de $130 \mu\text{m}^2$ avec $T_M = 100 \text{ ns}$ à 25°C .

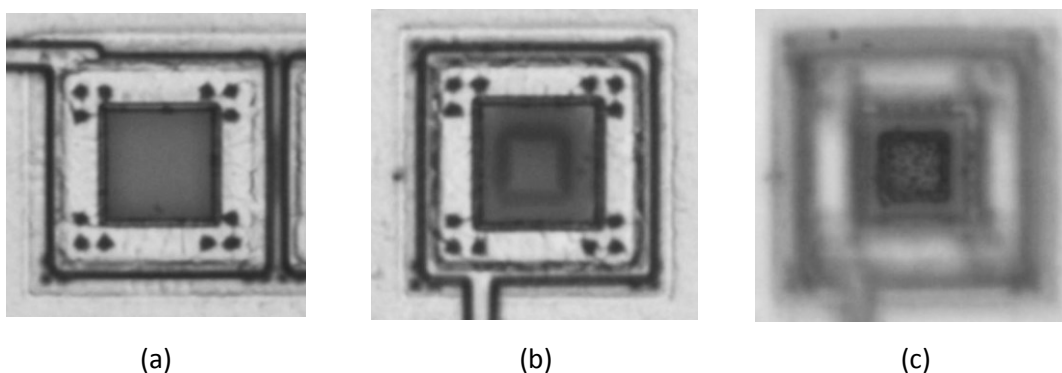


Figure 4.26 Photographie (a) d'un SPAD sans gravure du diélectrique. Photographie d'un SPAD avec gravure du diélectrique avec (b) le focus sur le dessus et (c) le focus au fond montrant la surface du SPAD détériorée.

La figure 4.27 montre que le SPAD à anneau de garde à diffusion typique a une PDP de 49 % à 480 nm et 27 % à 440 nm à $V_E = 4$ V. Le maximum de PDP mesuré sur le SPAD à anneau de garde virtuel est 28 % à 480 nm dans les mêmes conditions.

Tel qu'attendu, le SPAD à anneau de garde virtuel possède une PDP plus faible que le SPAD à anneau de garde par diffusion. Ce comportement s'explique par la plus faible région de multiplication du SPAD à anneau de garde virtuel, confirmé par sa plus faible tension de claquage, réduisant la probabilité que les photoporteurs atteignent la région de multiplication et déclenchent le claquage.

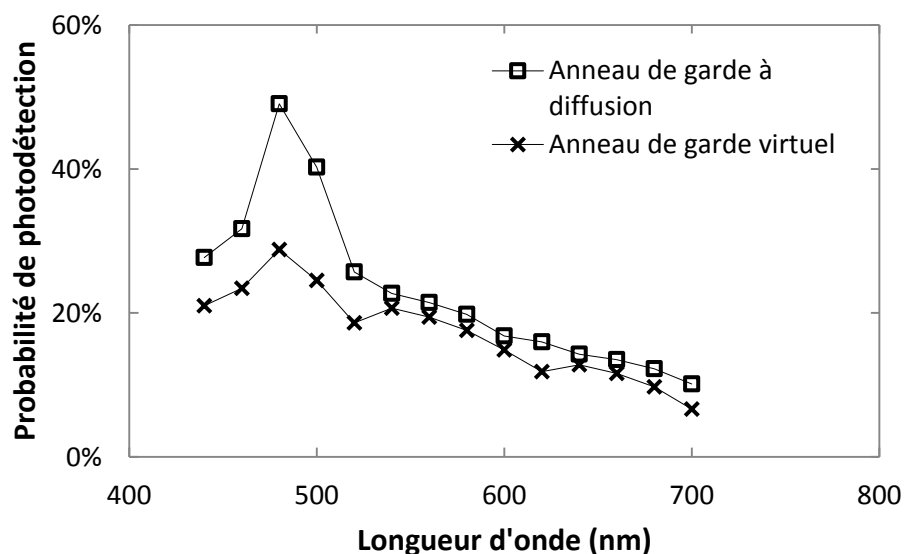


Figure 4.27 PDP en fonction de la longueur d'onde pour un SPAD à anneau de garde à diffusion typique (SPAD 1, matrice 6 de la puce B) et un SPAD à anneau de garde virtuel (SPAD 1, matrice 7 de la puce B) à $V_E = 4$ V et $T_M = 100$ ns à 25°C.

Validation du régime à photon unique

Les résultats de PDP permettent de valider l'hypothèse statuant que les SPAD sont sensibles à un seul photon.

En effet, l'émission de photons obéit à un processus de Poisson, c'est-à-dire que l'histogramme des délais entre chaque photon émis suit une distribution exponentielle. Ainsi, la probabilité P que plus d'un photon surviennent ($x=2$ à 5) dans un intervalle de temps $t=1$ ns s'exprime par :

$$P(X = x|\alpha t) = \frac{(\alpha t)^x e^{-\alpha t}}{x!}, x=2,3,4 \text{ et } 5 \quad \text{Éq. 4.19}$$

$$\alpha t = 1 \text{ ns} \times 1\,000\,000 \text{ s}^{-1} = 0,001 \quad \text{Éq. 4.20}$$

où αt est le nombre espéré de photons au cours de l'intervalle de temps $t=1$ ns, représentant le temps mis par le circuit pour étouffer l'avalanche soutenue. Dans ce cas, le calcul s'arrête à 5 photons dans la même nanoseconde puisqu'il devient très improbable de voir plus de 5 photons dans la même nanoseconde.

Le flux de photons maximum typique utilisé lors de la caractérisation de la PDP est 1 000 000 photons par seconde. Dans ce régime, la PDP d'un SPAD typique est évalué à 49 % à 480 nm. Ainsi, αt est égal à 0,001 et la probabilité P de voir plus d'un photon frapper le SPAD dans la même nanoseconde s'estime à 5×10^{-5} %. Or, dans ce même régime de fonctionnement, on mesure en laboratoire une PDP maximale de 49 %. C'est-à-dire que 49 % des photons incidents au SPAD déclenchent un claquage et sont détectés. La presque totalité de ces événements sont nécessairement déclenchés par un seul photon puisque la probabilité de voir plus d'un photon est très faible. Puisque la probabilité de voir 2 photons dans une même nanoseconde est très faible et que l'on mesure une PDP de 49 %, il est possible d'en conclure que les événements mesurés sur les SPAD se déclenchent par un seul photon.

4.8 Mesures de résolution temporelle

La résolution temporelle a été caractérisée sur le deuxième prototype exclusivement.

4.8.1 Méthode de caractérisation

Le montage utilisé pour la mesure en temps est présenté à la figure 4.28 et utilise un laser Ti:Sapphire pulsé à 80 MHz ajusté à 800 nm. La largeur du pulse laser utilisé est de 4 ps et est mesurée par autocorrélation à l'aide d'un interféromètre de Michelson. Le faisceau est séparé en deux à l'aide d'un cube séparateur. Une partie du faisceau est acheminée vers une diode PIN rapide Becker & Hickl PHD-400n servant à générer un signal de référence pour la mesure en temps. L'autre partie du faisceau passe par un cristal doubleur servant à doubler la fréquence des photons par conversion spontanée [101]. À la sortie du cristal, on retrouve ainsi des photons à 800 nm de la source et 400 nm (photons convertis). Le faisceau passe ensuite dans un filtre interférentiel à 400 nm permettant d'obtenir un faisceau majoritairement bleu à 400 nm.

Ensuite, des filtres à densité neutre sont utilisés afin de réduire le nombre de photons par pulse et opérer le système en mode d'attente de photon (en anglais « *starved* »), c'est-à-dire en s'assurant qu'un seul photon par pulse laser déclenche le claquage de la jonction.

Pour ce faire, on ajuste les filtres à densité neutre pour obtenir une augmentation de quelques milliers de comptes par secondes lorsqu'on illumine le SPAD. Puisque le laser est pulsé à 80 MHz (80 millions de pulses par seconde), une augmentation de quelques milliers de comptes par seconde du SPAD signifie que la probabilité que le pulse laser contienne plus d'un photon est très faible (< 1 %) et négligeable. Ceci assure une opération en mode d'attente de photon.

La mesure de la résolution temporelle du SPAD σ_M se fait à l'aide d'un oscilloscope rapide LeCroy 6000a mesurant le délai entre le signal de référence et la sortie du SPAD. La résolution temporelle se calcule par un lissage gaussien (*curve fit*) de l'histogramme des délais du signal de la diode de référence et le signal du circuit d'étouffement.

De la même façon, la résolution temporelle pulse à pulse du laser σ_L est évaluée avec un pulse de la diode de référence, et un pulse suivant de la même diode de référence. Ainsi, σ_L inclut également la résolution temporelle de la diode de référence. De cette façon, la résolution du SPAD σ_S se calcule selon :

$$\sigma_S = \sqrt{\sigma_M^2 - \sigma_L^2 - \sigma_{LL}^2 - \sigma_E^2} \quad \text{Éq. 4.21}$$

où σ_{LL} est la largeur du pulse laser et σ_E est la résolution temporelle du circuit d'étouffement du SPAD.

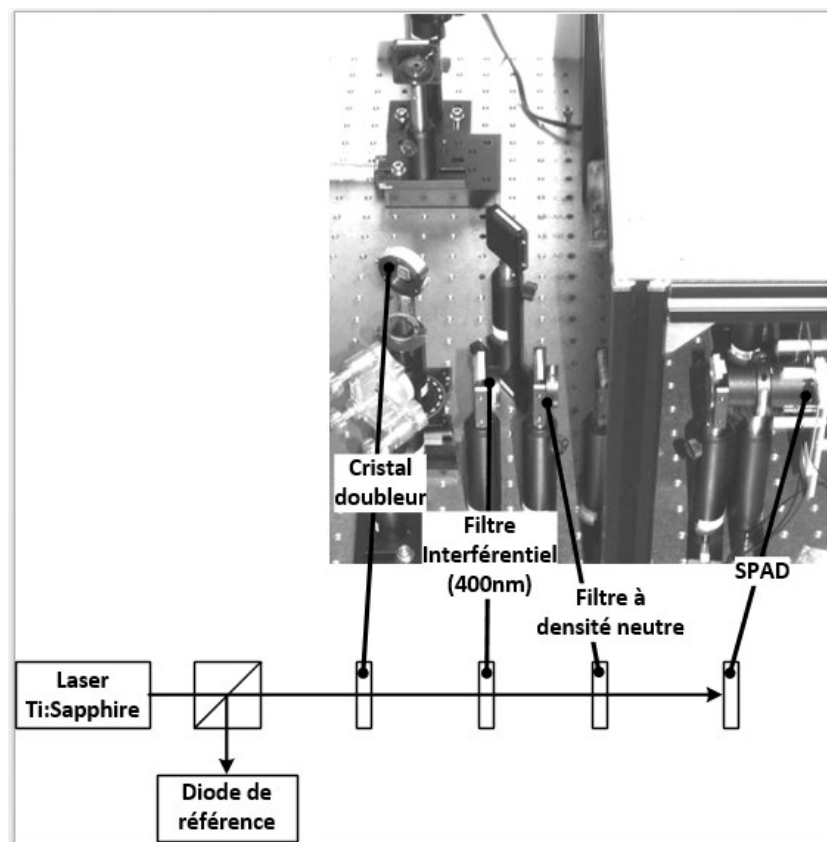


Figure 4.28 Photographie et schéma du montage permettant la mesure de résolution temporelle et utilisant un laser pulsé Ti:Sapphire.

Limitations du montage

Le montage utilisé présente quelques limitations. Premièrement, le signal de référence ainsi que la largeur du pulse laser sont mesurés avant la conversion des photons faite par le cristal doubleur due à des limitations d'espace de travail. Les effets de ce dernier sur le pulse laser ne sont pas pris en compte et pourraient avoir comme effet de légèrement sous-estimer la largeur du pulse laser atteignant le SPAD.

Deuxièmement, le filtre interférentiel ne soustrait pas complètement les photons de 800 nm du faisceau. Quoiqu'ils soient probablement en nombre négligeable, il est difficile de mesurer leur nombre. Comme les photons de 800 nm s'absorbent plus en profondeurs, ils ont comme effet de

générer des porteurs en profondeur qui diffusent jusqu'à la région de multiplication. Ils engendrent des délais importants augmentant la queue dans les résultats de mesures en temps.

Contrairement à un filtre interférentiel, un filtrage spatial utilisant un prisme permettrait de supprimer tous les photons de longueur d'onde non désirée (800 nm et autres).

4.8.2 Résultat du deuxième prototype

La figure 4.29 montre l'histogramme des délais d'arrivée d'un pulse de SPAD par rapport au temps d'émission d'un pulse laser.

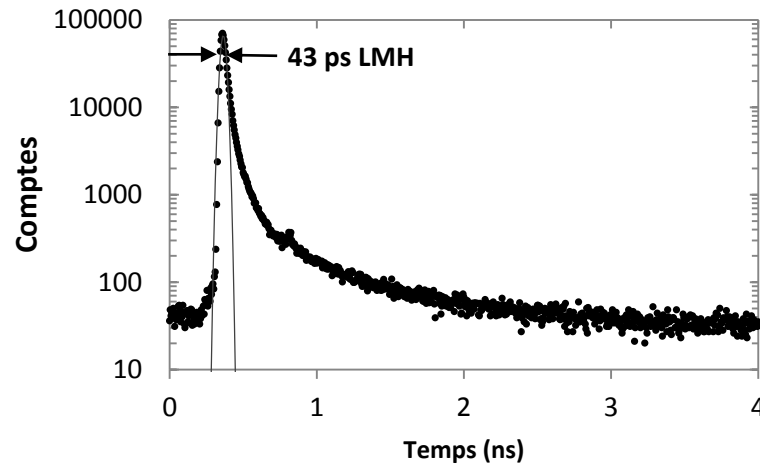


Figure 4.29 Histogramme des délais d'arrivée d'événements montrant la résolution temporelle d'un SPAD à anneau de garde à diffusion $58 \mu\text{m}^2$ (SPAD 3, matrice 4 de la puce B) à $V_E = 3 \text{ V}$ et $T_M = 50 \text{ ns}$ à 25°C mesurés avec un pulse laser de 4 ps LMH à 400 nm.

La figure 4.30 montre la résolution temporelle pour 3 SPAD de différentes dimensions avec anneau de garde à diffusion et virtuel. En comparant le SPAD à anneau de garde à diffusion de $256 \mu\text{m}^2$ et le SPAD à anneau de garde virtuel de $121 \mu\text{m}^2$, on constate que le SPAD à anneau de garde virtuel présente une résolution temporelle plus élevée. À $V_E = 3 \text{ V}$, sa résolution temporelle est de 86 ps LMH comparée à 52 ps LMH pour le SPAD à anneau de garde à diffusion de $256 \mu\text{m}^2$. Cette résolution temporelle plus faible et donc meilleure peut s'expliquer par la capacité de jonction plus faible du SPAD à anneau de garde à diffusion, tel que présenté à la section 5.1.

Le SPAD à anneau de garde à diffusion de $58 \mu\text{m}^2$ possède une résolution temporelle de 40 ps LMH à $V_E = 3 \text{ V}$ et de 27 ps LMH à $V_E = 5 \text{ V}$.

En soustrayant la contribution quadratique de la résolution pulse à pulse du laser de 6,5 ps LMH²⁹, la largeur de pulse du laser de 4 ps LMH et la résolution mesurée du circuit d'étouffement de 18 ps LMH, la résolution temporelle de ce SPAD s'estime à 18 ps LMH à $V_E = 5$ V. Cette analyse néglige la résolution temporelle de la diode de référence.

La tension excédentaire appliquée sur les SPAD est limitée par le DCR de ces derniers. Afin d'augmenter la tension appliquée et améliorer la résolution temporelle, la température des détecteurs pourrait être diminuée pour réduire le DCR.

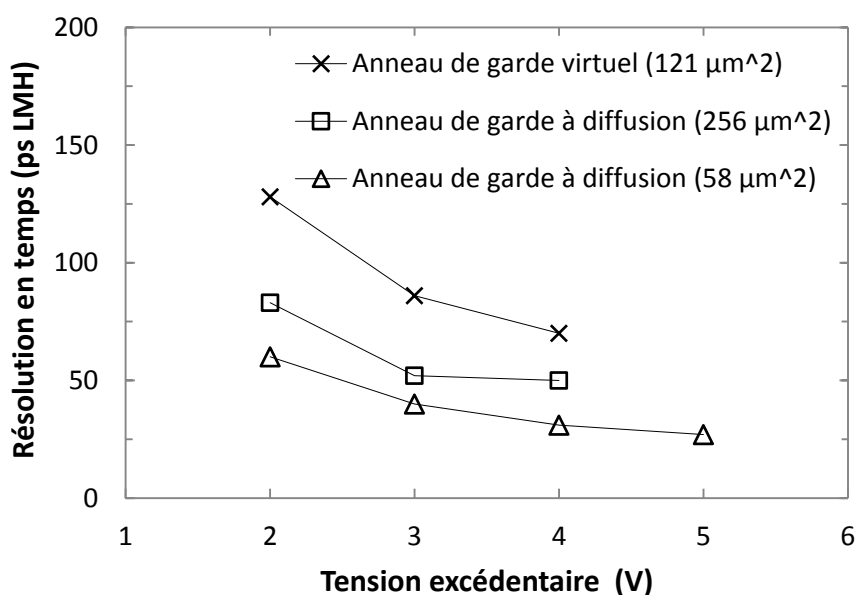


Figure 4.30 Résolution temporelle mesurée en fonction de la tension excédentaire pour deux SPAD à anneau de garde à diffusion de superficie différente et un SPAD à anneau de garde virtuel avec $T_M = 50$ ns à 25°C.

La figure 4.31 montre la résolution temporelle en fonction de la superficie de SPAD à anneau de garde à diffusion à $V_E = 3$ V. On peut y voir une relation linéaire de la surface du SPAD sur la résolution temporelle causé par la capacité de jonction.

²⁹ Cette mesure inclut la résolution en temps de la diode de référence.

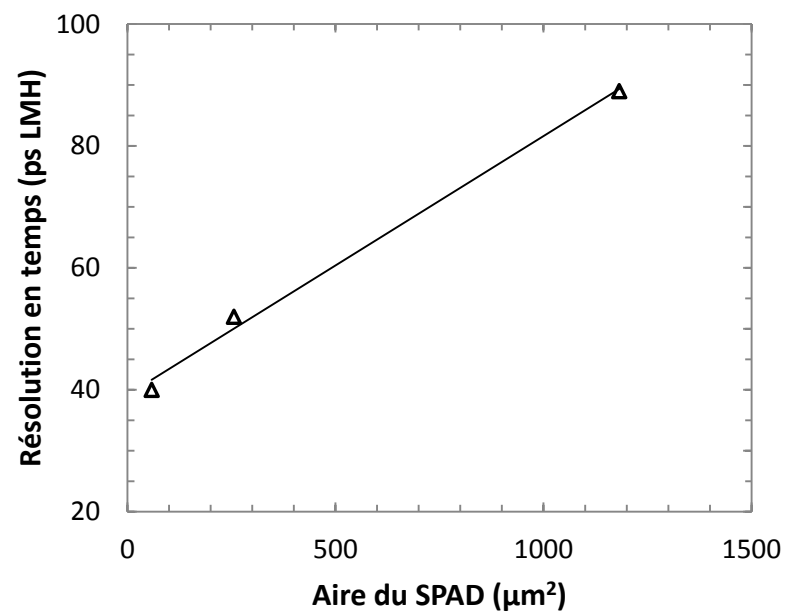


Figure 4.31 Résolution temporelle en fonction de l'aire de SPAD de à anneau de garde à diffusion à $V_E = 3 \text{ V}$ et $T_M = 50 \text{ ns}$ à 25°C .

CHAPITRE 5. DISCUSSION

Ce chapitre présente la discussion des résultats présentés au chapitre 4 en insistant sur les relations entre les différents résultats. Des recommandations sont également émises pour les suites du projet.

5.1 Simulations vs caractérisation

5.1.1 Tension de claquage

Les simulations de la tension de claquage des SPAD à anneau de garde par diffusion dans un puits n profond se situent autour de 20 V et les résultats de caractérisation autour de 19,5 V. Ces résultats signifient que le modèle de simulations utilisé pour ce SPAD semble fiable.

Les simulations du SPAD à anneau de garde virtuel quant à elles montrent une tension de claquage autour de 14 V et les résultats de simulation autour de 18 V. Ces résultats indiquent que le modèle utilisé pour ce SPAD présente certaines limitations. Cette variation de la tension de claquage est probablement causée par le maillage de la région de multiplication de la jonction simulée. En effet, étant donné que le champ électrique de cette région est plus élevé que le SPAD à anneau de garde par diffusion, le logiciel converge plus difficilement. Il est conseillé d'améliorer le maillage du dispositif.

5.1.2 Isolation à puits p

Les résultats de simulations montrent qu'un puits p permet d'isoler électriquement les SPAD et que la déplétion complète du puits n est possible avec une tension de polarisation de 20 V. Cependant, les résultats de caractérisation montrent une diaphonie électrique à la recharge non-négligeable lorsque ces SPAD sont intégrés en matrice 3×3 . La simulation ne semble donc pas représentative de la réalité. Cependant, dans certains SPAD du premier prototype utilisant le puits p comme anneau de garde, une déplétion complète du puits n s'observe en pratique par une mesure de tension de claquage élevé (30 V).

Ces résultats nous poussent à croire que dans certaines conditions, inconnues, la déplétion du puits n n'a plus lieu, par exemple lorsque les SPAD sont intégrés en matrice. Il est suggéré de concevoir une

matrice 3×3 avec la possibilité de modifier le potentiel appliqué sur l'isolation du puits p . Cette structure validerait s'il est possible d'appauvrir complètement le puits n en appliquant une tension inverse de quelques volts.

5.1.3 Comportement des anneaux de garde

Les résultats de simulations montrent un champ électrique de l'anneau de garde virtuel plus faible que l'anneau de garde par diffusion. Un anneau de garde à faible champ électrique empêche le claquage latéral et favorise le claquage verticales.

De plus, à la tension de claquage du SPAD à anneau de garde par diffusion, le maximum de champ électrique de son anneau de garde est $2,5 \times 10^5 \text{ Vcm}^{-1}$ et celui de la région de multiplication $5,2 \times 10^5 \text{ Vcm}^{-1}$. Puisque le champ électrique de l'anneau de garde est relativement élevé comparé à celui de la région de multiplication, on peut s'attendre qu'en pratique le champ électrique de l'anneau de garde soit très sensible à la structure du SPAD. Il est donc probable que des avalanches soutenues se déclenchent dans l'anneau de garde des SPAD à diffusion pour certains SPAD où le champ électrique de l'anneau de garde est plus élevé. Ceci peut expliquer pourquoi le DCR est très sensible à l'espacement anode-cathode (EAC).

Par contre, les excellents résultats de PDP indiquent que le claquage des SPAD à anneau de garde virtuel et par diffusion se fait bel et bien majoritairement dans la région photosensible. Pour réduire le DCR, il est recommandé de concevoir les SPAD futurs dans cette technologie avec la structure recommandée (section 5.4.1).

5.1.4 Performances en temps

Les simulations des SPAD montrent que la région de déplétion du SPAD à anneau de garde virtuel est plus étroite que le SPAD à anneau de garde à diffusion. Pour une même surface, la capacité de jonction est donc plus élevée. Ce comportement se valide en observant les résultats de résolution temporelle du SPAD à anneau de garde virtuel de 86 ps LMH plus faibles que son homologue à anneau de garde à diffusion, de 52 ps LMH dans les mêmes conditions. De plus, la surface du SPAD à anneau de garde virtuel dans cette mesure est deux fois plus faible que le SPAD à anneau de garde à diffusion. Pour des SPAD de même surface, la différence de résolution temporelle devrait être encore plus marquée.

La dégradation de la résolution temporelle du SPAD à anneau de garde virtuel peut également s'expliquer par la résistance de jonction mesurée à plus de 4 fois celle de son homologue à anneau de garde par diffusion. Cette résistance de jonction augmente la constante de temps de l'avalanche soutenue et détériore les performances en temps.

Il est recommandé de caractériser la résolution temporelle de SPAD à anneau de garde virtuel et par diffusion en fonction de leurs surfaces respectives. La surface de chaque type de SPAD devrait être identique pour permettre la comparaison de la résolution temporelle entre ces deux types de SPAD avec plus de certitude.

5.2 Diaphonie

5.2.1 Isolation à puits p

La méthode d'isolation par puits p présente le meilleur compromis entre la probabilité de diaphonie et l'espace mort. Une diaphonie totale (incluant les événements instantanés et retardés) directe de 6,6 % a été mesurée pour un SPAD de $1182 \mu\text{m}^2$ à $V_E = 4 \text{ V}$ avec un espace mort de $9,5 \mu\text{m}$. Lorsqu'ils sont intégrés en matrice 3×3 , les SPAD présentent une diaphonie directe de 16 % dominée par la diaphonie électrique à la recharge. L'isolation p semble donc moins efficace lorsque les SPAD sont intégrés en matrices 3×3 comparativement à une intégration en paires (c.-à-d. deux SPAD côte à côte).

La diaphonie est le point faible des SPAD développés dans ce projet puisqu'une diaphonie supérieure à 10 % est non désirable puisqu'elle augmente drastiquement le taux de comptage en noirceur des SPAD intégrés en matrice (section 2.4.6). Pour cette raison, les sources de diaphonie ainsi que les méthodes d'isolation devraient être étudiées plus en profondeur avec les prototypes futurs. De plus, l'isolation à puits p pourrait s'améliorer s'il pouvait se polariser à un potentiel négatif comparativement au substrat. De cette façon, le puits p pourrait être forcé à appauvrir complètement le puits n profond et ainsi isoler complètement les SPAD.

5.2.2 Intégration sans isolation

Les SPAD sans isolation ne sont pas recommandés même s'ils permettent d'avoir un espace mort plus petit, jusqu'à $5,5 \mu\text{m}$. La caractérisation de cette isolation dévoile une probabilité de diaphonie moins

élevée qu'une matrice de 3×3 SPAD isolée avec un puits p . Par contre, la dimension des SPAD sans isolation caractérisés est plus petite que les SPAD à isolation à puits p . Des SPAD sans isolation intégrés en matrice de dimension similaire aux SPAD à isolation à p devraient avoir une diaphonie plus élevée que l'isolation par puits p dans les mêmes conditions. Une étude approfondie de ce comportement devrait être menée dans une génération future de SPAD.

5.2.3 Isolation à puits n

Finalement, l'isolation à puits n n'est pas recommandée pour une intégration de SPAD en matrices destinées à une application où le facteur de remplissage est critique. En effet, l'espace mort minimal atteignable avec ce type d'isolation est $27 \mu\text{m}$, limité par la longueur de diffusion du puits n . Par contre, cette méthode d'isolation peut être considérée pour une application où le taux de comptage en obscurité est critique. Puisque les matrices de SPAD utilisant cette méthode possèdent une probabilité de diaphonie faible, on peut s'attendre à un taux de comptage en obscurité total plus faible qu'avec les autres méthodes d'isolation.

5.2.4 Résumé

La diaphonie selon l'isolation de SPAD intégrés en matrice 3×3 nécessite une étude plus approfondie en fonction de différentes dimensions de SPAD et de différentes largeurs d'isolation afin de mieux comparer les méthodes d'isolation.

En résumé, l'isolation en puits p semble le meilleur compromis entre le facteur de remplissage et la diaphonie. Par contre, la méthode doit être améliorée pour éviter la diaphonie électrique à la recharge. La solution proposée et à explorer consiste à polariser en inverse l'isolation à puits p comparativement au substrat pour forcer un appauvrissement complet du puits n . Si la diaphonie électrique à la recharge peut être évitée, cette méthode sera recommandée pour les applications nécessitant une matrice de SPAD à grand facteur de remplissage et un bon PDP.

En revanche, les matrices sans isolation ne sont pas recommandées. Finalement, les matrices avec une isolation à puits n sont recommandées pour les applications nécessitant un faible taux de comptage en obscurité.

5.3 Point d'opération optimal d'une matrice

Pour une intégration 3D, il est conseillé d'utiliser la matrice M1 de la puce A du deuxième prototype et de l'opérer à 10°C et $V_E = 2$ V et un temps mort de 200 ns. Avec ces paramètres, la diaphonie devrait être négligeable et la probabilité d'*afterpulsing* devrait être d'environ 6%. La PDP à 440 nm par SPAD devrait se situer autour de 20 %. En considérant le facteur de remplissage de 11,7 %, la PDP de la matrice devrait chuter à 2 %. Le faible facteur de remplissage est causé par l'isolation à puits n . La résolution temporelle par SPAD devrait être de 75 ps LMH. Le DCR normalisé par SPAD devrait se situer autour de $200 \text{ s}^{-1}\mu\text{m}^{-2}$ et pour la matrice $23 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$.

Un des problèmes des SPAD développés dans ce projet est le DCR élevé. Pour le réduire, il faut diminuer la tension d'opération et la température ainsi que réduire la dimension des SPAD. La température peut facilement être réduite à 10°C en gardant une probabilité d'*afterpulsing* raisonnable. Par contre, la PDP se trouve grandement affectée par le faible facteur de remplissage proposé.

L'isolation par puits p n'est pas suggérée dans ce prototype puisqu'elle présente une diaphonie trop élevée et doit être optimisée pour éviter la diaphonie électrique à la recharge avant d'être utilisée dans de futurs prototypes.

Performances envisageables pour une matrice à puits p

Avec l'étude du DCR, de l'*afterpulsing* et de la diaphonie réalisée dans cet ouvrage, il est possible d'envisager un point d'opération pour la future génération de SPAD intégrée en matrice avec au moins 40 % de facteur de remplissage et une isolation à puits p . Ces SPAD pourraient être polarisés à $V_E = 3$ V, à 25°C et un temps mort de 100 ns. Ceci permettrait d'avoir un DCR d'environ $50 \text{ s}^{-1}\mu\text{m}^{-2}$ ($20 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ pour une matrice), une probabilité d'*afterpulsing* de 4 %, une PDP par SPAD de 25 % et pour une matrice de 10 %. La résolution temporelle n'a pas été mesurée pour un SPAD d'une plus grande dimension, il est donc difficile de prévoir, mais elle devrait se situer autour de 100 ps LMH. La diaphonie devrait se situer autour de 5 % et être dominée principalement par la diaphonie électrique à la recharge.

Les SPAD de prochaines générations inspirées de recommandations basées sur les travaux de ce projet (section 5.4.1) permettront une amélioration importante des performances de la matrice. Pour un DCR semblable, la matrice devrait s'opérer à température ambiante et la PDP de la matrice devrait pouvoir

passer de 2 à 12 %, une amélioration majeure. Le DCR pourrait se réduire d'un facteur 5 environ en abaissant V_E à 2 V et/ou d'un facteur 5 en abaissant la température d'opération à 10°C.

5.4 Autres recommandations

5.4.1 Structure de SPAD recommandée

Les résultats présentés démontrent clairement que la tension de claquage a un impact important sur le DCR. La structure de SPAD recommandée utilise donc une implantation de type p (P_{ajuste}) disponible dans la technologie et implantée dans la région photosensible du SPAD, comme le démontre la figure 5.1. Le dopage de cette implantation sert à réduire le dopage effectif du puits n , dans la région photosensible.

De plus, la distribution des contacts devrait être symétrique et la distance EAC devrait se situer entre 4 et 6 μm pour éviter le claquage latéral.

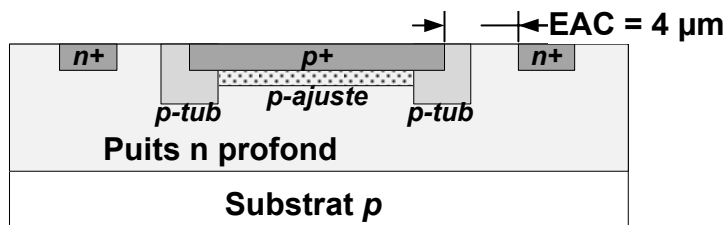


Figure 5.1 Vue en coupe d'une structure de SPAD recommandée utilisant une implantation p -ajuste dans la région de multiplication pour réduire le dopage n effectif, réduire le champ électrique et augmenter la tension de claquage du dispositif.

Les résultats de simulations sur Taurus Medici de la jonction montrés à la figure 5.2, indiquent bien que le champ électrique de cette structure est moins élevé comparé à la structure typique et permet de supposer une tension de claquage plus élevée.

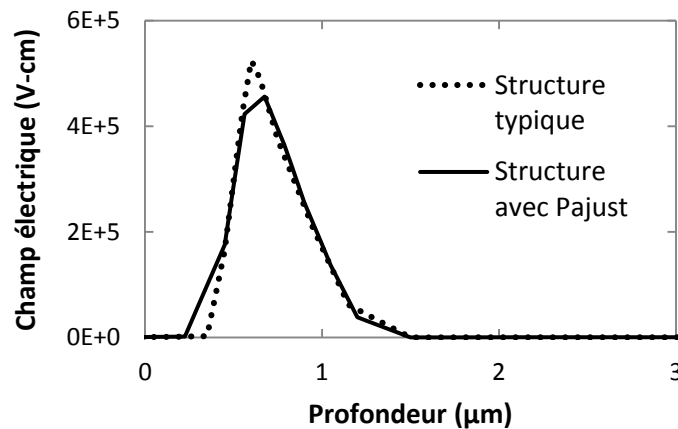


Figure 5.2 Simulations avec Taurus Medici du champ électrique en fonction de la profondeur dans la région de multiplication d'une structure typique à anneau de garde par diffusion avec et sans implantation d'ajustement de la tension de claquage P_{ajust} .

Isolation

Il est recommandé d'utiliser un puits p pour isoler les SPAD et augmenter le facteur de remplissage. Ce dernier devrait pouvoir se polariser à une tension variable afin d'appauvrir complètement le puits n profond sous le puits p . Il est donc essentiel d'évaluer la diaphonie optique et électrique en fonction de la tension de polarisation appliquée sur le puits p .

Probabilité de photodétection

La PDP de la structure idéale pourrait être améliorée en faisant une gravure humide afin de réduire l'épaisseur du diélectrique utilisé en fin de procédé et servant de barrière contre les contaminants extérieurs. Une gravure humide permettrait probablement de conserver la qualité de surface et d'améliorer la PDP. Une réduction de l'épaisseur de diélectrique permettrait d'augmenter la transmission de la lumière vers la région photosensible du SPAD.

Pour s'assurer de conserver ces propriétés, il est recommandé de graver partiellement la couche. Malgré tout, une couche plus mince pourrait rendre les dispositifs plus sensibles aux contaminants. Pour cette raison, une fois cette gravure faite, les diodes devraient être manipulées avec soin. Pour obtenir des résultats reproductibles, la gravure humide devrait être effectuée sous des conditions de concentration, température et agitation rigoureusement contrôlées.

5.4.2 Étude du DCR

Une structure contenant différents SPAD devrait être conçue afin d'évaluer l'effet de l'anneau de garde et de l'EAC sur le DCR. Pour ce faire, une série de SPAD avec la même surface, mais différents périmètres devraient être conçus. Cette même série de SPAD devrait être conçue avec différents EAC. De cette façon, l'effet de l'anneau de garde sur le DCR pourra être clairement étudié de même que l'EAC.

5.4.3 Étude de la diaphonie

Le métal ajouté pour couvrir un des SPAD des paires de SPAD servant à la mesure de diaphonie est futile. Lorsque ces SPAD sont éclairés, des photons arrivent à déclencher le SPAD par des réflexions entre les couches diélectriques des niveaux de métal. En effet, on note une dépendance entre l'intensité de la lumière et la probabilité de diaphonie sur ces paires, confirmant que la lumière déclenche les SPAD couverts de métallisation. Les structures utilisées pour les mesures de la diaphonie ne devraient donc pas utiliser de couverture métallique. Les SPAD pour la mesure de diaphonie devraient plutôt donner la possibilité de rester éteint par un signal de configuration. De cette façon, la diaphonie pourrait facilement se caractériser en prenant une mesure de DCR de deux SPAD adjacents avec un des SPAD éteint puis allumé.

Les structures pour la mesure de diaphonie devraient comprendre des SPAD de différentes dimensions pour évaluer l'impact de la dimension du SPAD sur la diaphonie.

5.4.4 SPAD à anneau de polysilicium

La structure à anneau de polysilicium sert à évaluer le courant provenant de la surface du SPAD en mode linéaire afin d'évaluer l'induction de DCR par la surface du SPAD et son anneau de garde.

La structure devrait être conçue à nouveau. Mais cette fois, la grille de polysilicium ne devrait pas chevaucher la région $p+$, telle que montrée à la figure 5.3. De plus, pour évaluer l'anneau de garde, la grille devrait se polariser en inverse par rapport à la polarisation du puits n et d'au maximum 5 V pour éviter le claquage de l'oxyde de grille. Par exemple, dans le cas où le puits n est polarisé à 22 V, une tension entre 18 V et 27 V devrait être appliquée sur la grille.

L'anneau de polysilicium pourrait être utilisé afin de réduire l'EAC par une diminution du champ électrique latérale. Cette possibilité devrait être évaluée par simulation Medici.

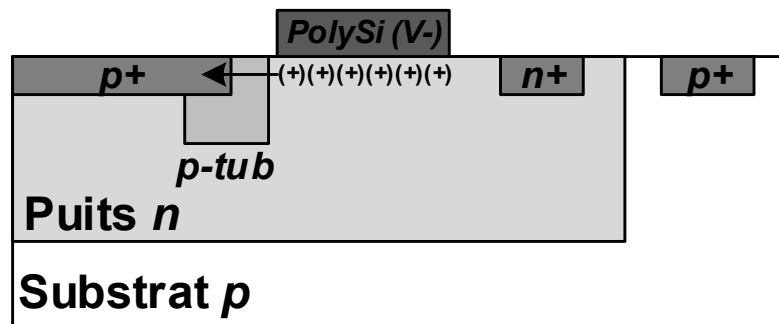


Figure 5.3 Vue en coupe d'un SPAD avec un anneau de polysilicium en périphérie du SPAD montrant le cas où un potentiel négatif (V-) par rapport à la polarisation du puits *n* est appliqué permettant l'inversion de population à la surface.

CHAPITRE 6. CONCLUSION

Ce document présente le développement de SPAD dédiés à une intégration 3D de matrices avec leurs circuits d'éteuffement actifs. La technologie retenue pour la conception est le procédé CMOS HV 0,8 μm de *Teledyne DALSA*. Ce procédé haut-voltage se base sur une couche d'épitaxie et possède plusieurs couches de diffusion avec des dopages faibles laissant place à l'optimisation du DCR, de la diaphonie, de la PDP et de la résolution temporelle.

Le développement de SPAD dans ce projet a rempli la majorité des objectifs initiaux. L'objectif principal est complètement atteint et consistait à concevoir une matrice de SPAD dédiée à une intégration 3D hétérogène avec leurs circuits d'éteuffement. Six matrices de 22×22 SPAD ont été conçues dans le cadre de ce projet. Quoiqu'elle n'ait pas été caractérisée en 3D, les résultats de l'intégration 2D de SPAD avec leurs circuits d'éteuffement actifs démontrent que toutes ces matrices sont fonctionnelles en 2D et par conséquent devraient être fonctionnelles en 3D.

Les objectifs secondaires sont presque tous atteints également. Le premier objectif consistait au développement de SPAD avec une PDP entre 20 et 40 % à 480 nm, un DCR inférieur à $10 \text{ s}^{-1}\mu\text{m}^{-2}$, une probabilité d'*afterpulsing* <5 % et une résolution temporelle <50 ps largeur à mi-hauteur (LMH). Les résultats de caractérisation montrent qu'il est possible d'atteindre une résolution temporelle de 27 ps LMH et un DCR de $3 \text{ s}^{-1}\mu\text{m}^{-2}$. Les résultats démontrent également qu'il est possible d'atteindre une PDP de 49 %.

Le second sous-objectif était de développer une méthode d'isolation permettant d'obtenir un facteur de remplissage d'au moins 50 % avec une diaphonie inférieure à 10 %. Cet objectif est partiellement atteint. Une méthode d'isolation utilisant un puits *p* a été développée. Les SPAD conçus en paires (deux SPAD côte à côte) avec cette méthode ont un facteur de remplissage de 54 % et montrent une probabilité de diaphonie de 6,6 % à une tension excédentaire de 4 V. Par contre, lorsque ces mêmes SPAD sont intégrés en matrice de 3×3 SPAD, la probabilité de diaphonie devient 16 % dans les mêmes conditions. Une étude plus approfondie de la diaphonie en matrice est donc nécessaire pour réduire la diaphonie électrique à la recharge de SPAD utilisant cette méthode d'isolation.

Les résultats de caractérisation de SPAD avec de multiples variantes ont permis de proposer une structure claire de SPAD de prochaine génération. De plus, différentes structures de tests sont

conseillées. Toutes ces recommandations ont comme but principal de réduire le DCR, augmenter la PDP et réduire la diaphonie totale des SPAD utilisant une isolation à puits p .

Les détecteurs présentés dans cette thèse sont à ce jour les premiers SPAD connus de la littérature à être implantés dans la technologie CMOS HV de *Teledyne DALSA*. De plus, des matrices de ces SPAD sont conçues pour une intégration avec leurs circuits d'étouffement en 3D utilisant des TSV (*Through Silicon Via*), un paradigme d'intégration innovant par rapport à ce qui est retrouvé dans la littérature. Finalement, cette thèse décrit des méthodes d'évaluation de la diaphonie permettant de mettre en lumière la distribution de la diaphonie dans le temps et mettre en évidence de façon précise la diaphonie électrique à la recharge. Cette méthodologie est peu commune dans la littérature scientifique.

Le choix initial de la technologie québécoise CMOS HV 0,8 μm de *Teledyne DALSA* était une excellente intuition pour le développement de SPAD. Ces derniers démontrent des performances remarquables pour des premiers prototypes. À la lumière des résultats obtenus dans ce projet, il semble évident que les développements futurs de SPAD dans cette technologie permettront l'amélioration des performances en termes de PDP, de DCR et de diaphonie. De plus, il est souhaitable que les résultats de cette thèse sachent convaincre d'autres chercheurs à développer des SPAD au Québec et pousser notre province dans les premiers rangs de la course mondiale aux meilleurs SPAD.

Liste des références

- [1] D. Renker and E. Lorenz, "Advances in solid state photon detectors," *Journal of Instrumentation*, vol. 4, pp. P04004 (55 pp.), 2009.
- [2] ITRS, "INTERNATIONAL TECHNOLOGY ROADMAP FOR SEMICONDUCTORS 2009 EDITION PROCESS INTEGRATION, DEVICES, AND STRUCTURES," 2009.
- [3] A. B. Kahng, "Scaling: More than Moore's law," *IEEE Des. Test Comput.*, vol. 27, pp. 86-87, 2010.
- [4] G. M. Williams and A. S. Huntington, "Probabilistic analysis of linear mode vs. geiger mode APD FPAs for advanced LADAR enabled interceptors," in *Spaceborne Sensors III*, 2006, pp. 622008-1.
- [5] H. Feng, P. Kaaret and H. Andersson, "Double-layer silicon PIN photodiode X-ray detector for a future X-ray timing mission," *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section A (Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment)*, vol. 564, pp. 347-51, 2006.
- [6] C. L. Niclass, "Single-Photon Image Sensors in CMOS: Picosecond Resolution for Three-Dimensional Imaging," 2008.
- [7] P. Berard, M. Bergeron, C. M. Pepin, J. Cadorette, M. Tetrault, N. Viscogliosi, R. Fontaine, H. Dautet, M. Davies, P. Deschamps and R. Lecomte, "Development of a 64-channel APD detector module with individual pixel readout for submillimetre spatial resolution in PET," *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section A (Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment)*, vol. 610, pp. 20-3, 2009.
- [8] R. Fontaine, F. Belanger, J. Cadorette, J. -. Leroux, J. -. Martin, J. -. Michaud, J. -. Pratte, S. Robert and R. Lecomte, "Architecture of a dual-modality, high-resolution, fully digital positron emission tomography/computed tomography (PET/CT) scanner for small animal imaging," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 52, pp. 691-6, 2005.
- [9] A. Nassalski, M. Moszynski, A. Syntfeld-Kzuch, L. Swiderski, T. Szczesniak, D. Wolski and T. Batsch, "Application of Hamamatsu S8550 APD array to the common PET/CT detector," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 55, pp. 2460-4, 2008.
- [10] Y. Wu, C. Catana and S. R. Cherry, "A multiplexer design for position-sensitive avalanche photodiode detectors in a PET scanner," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 55, pp. 463-8, 2008.
- [11] C. Catana, Y. Wu, M. S. Judenhofer, J. Qi, B. J. Pichler and S. R. Cherry, "Simultaneous Acquisition of Multislice PET and MR Images: Initial Results with a MR-Compatible PET Scanner," *J. Nucl. Med.*, vol. 47, pp. 1968-1976, December 1, 2006.
- [12] M. S. Judenhofer, H. F. Wehrl, D. F. Newport, C. Catana, S. B. Siegel, M. Becker, A. Thielscher, M. Kneilling, M. P. Lichy, M. Eichner, K. Klingel, G. Reischl, S. Widmaier, M. Rocken, R. E. Nutt, H.

- Machulla, K. Uludag, S. R. Cherry, C. D. Claussen and B. J. Pichler, "Simultaneous PET-MRI: a new approach for functional and morphological imaging," *Nat. Med.*, vol. 14, pp. 459-465, 2008.
- [13] B. J. Pichler, M. S. Judenhofer, C. Catana, J. H. Walton, M. Kneilling, R. E. Nutt, S. B. Siegel, G. D. Claussen and S. R. Cherry, "Performance test of an LSO-APD detector in a 7-T MRI scanner for simultaneous PET/MRI," *Journal of Nuclear Medicine*, vol. 47, pp. 639-47, 2006.
- [14] J. S. B. Graham Hungerford and David, "Single-photon timing detectors for fluorescence lifetime spectroscopy," *Measurement Science and Technology*, vol. 7, pp. 121, 1996.
- [15] R. Fazel, H. M. Krumholz, Y. Wang, J. S. Ross, J. Chen, H. H. Ting, N. D. Shah, K. Nasir, A. J. Einstein and B. K. Nallamothu, "Exposure to Low-Dose Ionizing Radiation from Medical Imaging Procedures," *N. Engl. J. Med.*, vol. 361, pp. 849-857, 2009.
- [16] E. Roessl, B. Brendel, G. Martens, R. Proksa, F. Schmidt, A. Thran and J. Schlomka, "MO-D-210A-03: Energy-sensitive, photon-counting computed tomography: Opportunities and technological challenges," pp. 2699-2700, 2009.
- [17] D. Renker, "Geiger-mode avalanche photodiodes, history, properties and problems," *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section A :Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 567, pp. 48-56, 2006.
- [18] D. Renker, "Properties of avalanche photodiodes for applications in high energy physics, astrophysics and medical imaging," *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section A (Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment)*, vol. 486, pp. 164-9, 2002.
- [19] W. S. BOYLE and G. E. SMITH, "CHARGE COUPLED SEMICONDUCTOR DEVICES," vol. 49, pp. 587-593, 1970.
- [20] A. Hoffman, M. Loose and V. Suntharalingam, "CMOS detector technology," *Experimental Astronomy*, vol. 19, pp. 111-34, 2005.
- [21] S. R. Cherry, J. A. Sorenson and M. A. Phelps, *Physics in Nuclear Medecine*. United States of America: Saunders, 2003.
- [22] A. Douraghy, F. R. Rannou, R. W. Silverman and A. F. Chatzioannou, "FPGA electronics for OPET: a dual-modality optical and positron emission tomograph," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 55, pp. 2541-5, 2008.
- [23] G. K. Garipov, B. A. Khrenov, B. K. Lubsandorzhiev, S. A. Belyanchenko, V. A. Smolitskiy, U. Salazar and E. Fokitis, "The photomultiplier tubes in the light sensor of an orbital detector for studying the fluorescent radiation of extensive air showers," *Instruments and Experimental Techniques*, vol. 48, pp. 92-5, 2005.
- [24] E. C. Meister, U. P. Wild, P. Klein-Bolting and A. R. Holzwarth, "Time response of small side-on photomultiplier tubes in time-correlated single-photon counting measurements," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 59, pp. 499-501, 1988.

- [25] A. Mortimer and W. Michael Davidson, "Concepts in Digital Imaging Technology," vol. 2013.
- [26] D. Renker, "Geiger-mode avalanche photodiodes, history, properties and problems," *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section A (Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment)*, vol. 567, pp. 48-56, 2006.
- [27] S. Ban, H. Hirayama, Y. Namito, S. Tanaka, H. Nakashima, Y. Nakane and N. Nariyama, "Calibration of silicon PIN photodiode for measuring intensity of 7~40 keV photons," *J Nucl Sci Technol*, vol. 31, pp. 163-8, 1994.
- [28] Shin-Woong Park, S. Yuk, Jung-Byung Park and Y. Yi, "A design for a linear array PIN photodiode for use in a Computed mammo-Tomography (CmT) system," *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section A (Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment)*, vol. 610, pp. 210-14, 2009.
- [29] H. K. Kwang, S. K. Young and S. K. Jung, "Signal and noise performance of large-area PIN photodiodes and charge-sensitive preamplifiers for gamma radiography," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 591, pp. 63-6, 2008.
- [30] X. Jin and Y. Zeng, "Two-dimensional model and simulation of enhanced sensitivity PIN photodiode detector for 3D imager," in *2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA 2010)*, 2010, pp. 1059-62.
- [31] Y. Yatsu, Y. Kuramoto, J. Kataoka, J. Kotoku, T. Saito, T. Ikagawa, R. Sato, N. Kawai, S. Kishimoto, K. Mori, T. Kamae, Y. Ishikawa and N. Kawabata, "Study of avalanche photodiodes for soft X-ray detection below 20 keV," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 564, pp. 134-143, 2006.
- [32] R. Farrell, K. Vanderpuye, G. Entine and M. R. Squillante, "High resolution, low energy avalanche photodiode X-ray detectors," in *1990 IEEE Nuclear Science Symposium*, 1991, pp. 144-7.
- [33] E. R. Moutaye and H. Tap-Beteille, "Design of a CMOS APD array for a 3-D camera based on the time of flight distance measurement," in *2010 IEEE International Instrumentation & Measurement Technology Conference*, 2010, pp. 443-6.
- [34] D. Dupuy, M. Lescure and H. Tap-Beteille, "High frequency scanning response of an APD photocurrent for laser range finder," in *EUROSENSORS XVI*, 2004, pp. 289-93.
- [35] K. P. Ghiggino, M. R. Harris and P. G. Spizzirri, "Fluorescence lifetime measurements using a novel fibre-optic laser scanning confocal microscope," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 63, pp. 2999-3002, 1992.
- [36] R. J. McIntyre, "Theory of microplasma instability in Silicon," *J. Appl. Phys.*, vol. 32, pp. 983-995, 1961.
- [37] R. H. Haitz, "Model for electrical behavior of microplasma," *J. Appl. Phys.*, vol. 35, pp. 1370-1376, 1964.

- [38] N. N. Armencha and D. V. Tarkhin, "Mechanisms governing the frequency of appearance of current pulses in silicon avalanche photodiodes," *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov*, vol. 5, pp. 273-9, 1971.
- [39] P. A. Ekstrom, "Triggered-avalanche detection of optical photons," *J. Appl. Phys.*, vol. 52, pp. 6974-9, 1981.
- [40] W. Haecker, O. Groezinger and M. H. Pilkuhn, "Infrared photon counting by Ge avalanche diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 19, pp. 113-15, 1971.
- [41] R. J. McIntyre, "On the avalanche initiation probability of avalanche diodes above the breakdown voltage," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED20, pp. 637-41, 1973.
- [42] S. Cova, A. Longoni and A. Andreoni, "Towards picosecond resolution with single-photon avalanche diodes," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 52, pp. 408-12, 1981.
- [43] S. Cova, G. Ripamonti and A. Lacaita, "Avalanche semiconductor detector for single optical photons with a time resolution of 60 ps," in *Fourth European Symposium on Semiconductor Detectors*, 1987, pp. 482-7.
- [44] M. Ghioni, S. Cova, A. Lacaita and G. Ripamonti, "Epitaxial silicon single photon detector with reduced carrier diffusion effect and picosecond resolution," in *87CH2515-5*, 1987, pp. 452-5.
- [45] A. Lacaita, S. Cova and M. Ghioni, "Four-hundred-picosecond single-photon timing with commercially available avalanche photodiodes," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 59, pp. 1115-21, 1988.
- [46] A. Lacaita, S. Cova, F. Zappa and P. A. Francese, "Subnanosecond single-photon timing with commercially available germanium photodiodes," *Opt. Lett.*, vol. 18, pp. 75-77, 1993.
- [47] A. Lacaita, M. Ghioni, F. Zappa, G. Ripamonti and S. Cova, "Recent advances in the detection of optical photons with silicon photodiodes," in *Sixth European Symposium on Semiconductor Detectors*, 1993, pp. 290-4.
- [48] T. Louis, G. H. Schatz, P. Klein-Bolting, A. R. Holzwarth, G. Ripamonti and S. Cova, "Performance comparison of a single-photon avalanche diode with a microchannel-plate photomultiplier in time-correlated single-photon counting," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 59, pp. 1148-52, 1988.
- [49] J. G. Rarity, K. D. Ridley and P. R. Tapster, "Absolute measurement of detector quantum efficiency using parametric downconversion," *Appl. Opt.*, vol. 26, pp. 4616-19, 1987.
- [50] A. N. Otte, J. Barral, B. Dolgoshein, J. Hose, S. Klemin, E. Lorenz, R. Mirzoyan, E. Popova and M. Teshima, "A test of silicon photomultipliers as readout for PET," *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section A (Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment)*, vol. 545, pp. 705-15, 2005.
- [51] E. Grigoriev, A. Akindinov, M. Breitenmoser, S. Buono, E. Charbon, C. Niclass, I. Desforges and R. Rocca, "Silicon photomultipliers and their bio-medical applications," *Nuclear Instruments and*

Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 571, pp. 130-133, 2007.

[52] S. Cova, M. Ghioni, A. Lotito, I. Rech and F. Zappa, "Evolution and prospects for single-photon avalanche diodes and quenching circuits," *Journal of Modern Optics*, vol. 51, pp. 1267-1288, 2004.

[53] D. R. Schaart, H. T. Van Dam, S. Seifert, R. Vinke, P. Dendooven, H. Lohner and F. J. Beekman, "A novel, SiPM-array-based, monolithic scintillator detector for PET," *Phys. Med. Biol.*, vol. 54, pp. 3501-3512, 2009.

[54] Phillips, "Phillips Digital Photon counting Press Backgrounder," vol. 2010, 2010.

[55] P. Eraerds, M. Legre, A. Rochas, H. Zbinden and N. Gisin, "SiPM for fast photon-counting and multiphoton detection," *Optics Express*, vol. 15, pp. 14539-49, 2007.

[56] C. Niclass, M. Sergio and E. Charbon, "A single photon avalanche diode array fabricated in deep-submicron CMOS technology," in *Design, Automation and Test in Europe, DATE'06, March 6, 2006 - March 10, 2006*, pp. European Design and Automation Association; The EDA Consortium; The IEEE Computer Society TTTC; ECSI; ACM SIGDA; RAS.

[57] T. Frach, G. Prescher, C. Degenhardt, R. de Gruyter, A. Schmitz and R. Ballizany, "The digital Silicon Photomultiplier - principle of operation and intrinsic detector performance," *IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference*, pp. 1959-65, 2009.

[58] L. Collins, "Into the third dimension [vertical integration]," *Electronics*, vol. 5, pp. 10-11, 2007.

[59] Philip Garrou, Christopher Bower et Peter Ramm, *Handbook of 3D Integration*. Wiley-VCH, 2008.

[60] V. F. Pavlidis and E. G. Friedman, "Interconnect-based design methodologies for three-dimensional integrated circuits," *Proc IEEE*, vol. 97, pp. 123-40, 2009.

[61] J. Burns, L. McIlrath, C. Keast, C. Lewis, A. Loomis, K. Warner and P. Wyatt, "Three-dimensional integrated circuits for low-power, high-bandwidth systems on a chip," in *Digest of Technical Papers*, 2001, pp. 268-9.

[62] V. Suntharalingam, R. Berger, J. A. Burns, C. K. Chen, C. L. Keast, J. M. Knecht, R. D. Lambert, K. L. Newcomb, D. M. O'Mara, D. D. Rathman, D. C. Shaver, A. M. Soares, C. N. Stevenson, B. M. Tyrrell, K. Warner, B. D. Wheeler, D. - W. Yost and D. J. Young, "Megapixel CMOS image sensor fabricated in three-dimensional integrated circuit technology," in *2005 IEEE International Solid-State Circuits Conference*, 2005, pp. 356-7.

[63] S. Q. Gu, U. Ray, Y. Li, A. Chandrasekaran, B. Henderson and M. Nowak, "3D TSV integration technology challenges for high volume production from fabless supply chain aspect," in *2010 IEEE International Interconnect Technology Conference - IITC*, 2010, pp. 3.

- [64] M. Puech, J. M. Thevenoud, J. M. Gruffat, N. Launay, N. Arnal and P. Godinat, "Fabrication of 3D packaging TSV using DRIE," in *2008 Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS*, 2008, pp. 109-14.
- [65] A. C. Rudack, W. K. Lay and G. G. Baker, "Infrared microscopy for overlay and defect metrology on 3D-interconnect bonded wafers," in *2010 21st Annual IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC 2010)*, 2010, pp. 347-52.
- [66] B. Wu, A. Kumar and S. Pamarthy, "High aspect ratio silicon etch: A review," *J. Appl. Phys.*, vol. 108, pp. 051101 (20 pp.), 2010.
- [67] B. Benoit-Louis, R. Vincent-Philippe, C. Audrey, B. Alexandre, C. Gabriella, C. Serge, F. Rejean and P. Jean-Francois, "Development of a single photon avalanche diode (SPAD) array in high voltage CMOS 0.8 μm dedicated to a 3D integrated circuit (3DIC)," in Anaheim, Californie, 2012, .
- [68] M. Liu, C. Hu, J. C. Campbell, Z. Pan and M. M. Tashima, "Reduce afterpulsing of single photon avalanche diodes using passive quenching with active reset," *IEEE J. Quant. Electron.*, vol. 44, pp. 430-4, 2008.
- [69] A. Gallivanoni, I. Rech, D. Resnati, M. Ghioni and S. Cova, "Monolithic active quenching and picosecond timing circuit suitable for large-area single-photon avalanche diodes," *Optics Express*, vol. 14, 2006.
- [70] K. Jradi, D. Pellion and D. Gin hac, "International workshop on new photon-detectors," in *Multi-Pixel Geiger Mode Imager for Medical Application*, 2013, .
- [71] F. Villa, B. Markovic, S. Bellisai, D. Bronzi, A. Tosi, F. Zappa, S. Tisa, D. Durini, S. Weyers, U. Paschen and W. Brockherde, "SPAD Smart Pixel for Time-of-Flight and Time-Correlated Single-Photon Counting Measurements," *IEEE Photonics Journal*, vol. 4, pp. 795-804, 2012.
- [72] W. J. Kindt, *Geiger Mode Avalanche Photodiode Array*. The Netherlands: Delft University Press, 1999.
- [73] D. Schroder, *Semiconductor Material and Device Characterization*, 2006.
- [74] B. G. Streetman and S. Banerjee, *Solid State Electronic Devices* /. Upper Saddle River, N.J. : Pearson/Prentice Hall,: 2006.
- [75] S. M. Sze and K. K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices*. Wiley-Interscience, 2006.
- [76] S. Cova, M. Ghioni, A. Lacaita, C. Samori and F. Zappa, "Avalanche photodiodes and quenching circuits for single-photon detection," *Appl. Opt.*, vol. 35, pp. 1956-76, 1996.
- [77] A. Rochas, M. Gani, B. Furrer, P. A. Besse, R. S. Popovic, G. Ribordy and N. Gisin, "Single photon detector fabricated in a complementary metal-oxide-semiconductor high-voltage technology," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 74, pp. 3263-70, 2003.

-
- [78] M. Gronholm, J. Poikonen and M. Laiho, "A ring-oscillator-based active quenching and active recharge circuit for single photon avalanche diodes," in *2009 European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD 2009)*, 2009, pp. 5-8.
- [79] F. Zappa, S. Tisa, A. Tosi and S. Cova, "Principles and features of single-photon avalanche diode arrays," *Sensors & Actuators: A. Physical*, vol. 140, pp. 103-12, 2007.
- [80] E. Charbon, "Towards large scale CMOS single-photon detector arrays for lab-on-chip applications," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 41, pp. 094010, 2008.
- [81] A. S. a. A. L. Lacaita, "Physics and numerical simulation of single photon avalanche diodes," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 44, pp. 1931, 1997.
- [82] A. Rochas, "Single Photon Avalanche Diodes in CMOS Technology," 2003.
- [83] S. Cova, A. Lacaita, M. Ghioni, G. Ripamonti and T. A. Louis, "20-ps timing resolution with single-photon avalanche diodes," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 60, pp. 1104-10, 1989.
- [84] A. Campisi, L. Cosentino, P. Finocchiaro, A. Pappalardo, F. Musumeci, S. Privitera, A. Scordino, S. Tudisco, G. Fallica, D. Sanfilippo, M. Mazzillo, G. Condorelli, A. Piazza, G. Valvo, S. Lombardo, E. Sciacca, G. Bonanno and M. Belluso, "Multipixel geiger-mode photon detectors for ultra-weak light sources," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 571, pp. 350-354, 2007.
- [85] I. Rech, S. Marangoni, D. Resnati, M. Ghioni and S. Cova, "Multipixel single-photon avalanche diode array for parallel photon counting applications," *Journal of Modern Optics*, vol. 56, pp. 326-33, 2009.
- [86] E. Sciacca, G. Condorelli, S. Aurite, S. Lombardo, M. Mazzillo, D. Sanfilippo, G. Fallica and E. Rimini, "Crosstalk characterization in Geiger-mode avalanche photodiode arrays," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 29, pp. 218-20, 2008.
- [87] S. Tisa, F. Guerrieri, A. Tosi and F. Zappa, "100 kframe/s 8 bit monolithic single-photon imagers," in *38th European Solid-State Circuits Conference, ESSCIRC 2008, September 15, 2008 - September 19, 2008*, pp. 274-277.
- [88] H. Finkelstein, M. J. Hsu and S. C. Esener, "STI-bounded single-photon avalanche diode in a deep-submicrometer CMOS technology," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 27, pp. 887-9, 2006.
- [89] S. Tisa, F. Zappa and I. Labanca, "On-chip detection and counting of single-photons," in *International Electron Devices Meeting 2005*, 2005, pp. 4.
- [90] A. Rochas, P. -. Besse and R. S. Popovic, "Actively recharged single photon counting avalanche photodiode integrated in an industrial CMOS process," in *EUROSENSORS XVI*, 2004, pp. 124-9.
- [91] M. Mazzillo, G. Condorelli, A. Piazza, D. Sanfilippo, G. Valvo, B. Carbone, G. Fallica, S. Billotta, M. Belluso, G. Bonanno, A. Pappalardo, L. Cosentino and P. Finocchiaro, "Single-photon avalanche

- photodiodes with integrated quenching resistor," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 591, pp. 367-73, 2008.
- [92] Hamamatsu, "Photomultiplier Tube R9800," Octobre, 2009.
- [93] Hamamatsu, "Si PIN photodiode S3590 series," 2006.
- [94] SensL, "SPMArray4 Scalable Silicon Photomultiplier Array," January, 2010.
- [95] S. Tisa, F. Guerrieri and F. Zappa, "Monolithic array of 32 SPAD pixels for single-photon imaging at high frame rates," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 610, pp. 24-27, 2009.
- [96] Sami Franssila, *Introduction to Micro Fabrication*. John Wiley & Son, Ltd, 2004.
- [97] V. Rhéaume, "Circuits d'instrumentation intégrés pour caractérisation de diodes monophotoniques à avalanche en HVCMOS 0,8 μm ," 2013.
- [98] I. Keithley Instruments, 28775, Aurora Road Cleveland, Ohio, 44139, 2011.
- [99] R. E. Canright, pp. 163-168 o.1, 1990.
- [100] P. C. M. Owens, J. G. Rarity, P. R. Tapster, D. Knight and P. D. Townsend, "Photon counting with passively quenched germanium avalanche," *Appl. Opt.*, vol. 33, pp. 6895-6901, 1994.
- [101] D. C. Burnham and D. L. Weinberg, "Observation of Simultaneity in Parametric Production of Optical Photon Pairs," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 25, pp. 84-87, 1970.

Annexe A. Prototype 1

Tableau A.1 Liste des signaux correspondant aux plots de la puce du prototype 1

No. SPAD	Plot Anode	Plot Cathode	Géométrie	Profondeur du puits n	Type d'anneau de garde	Diamètre (μm)	Tension de claquage (V)
A	29	30	Hexagonale	Peu profond	1	35	43
B	2	3	Circulaire	Peu profond	3	35	90
C	5	4	Circulaire	Profond	2	35	19
D	35	10	Circulaire	Profond	Aucun	35	13
E	7	6	Hexagonale	Profond	Aucun	35	13
F	31	28	Hexagonale	Peu profond	3	35	82
G	32	33	Circulaire	Profond	2	35	25
H	34	36	Circulaire	Profond	2	35	18
I	37	38	Circulaire	Profond	2	35	24
J	9	8	Hexagonale	Profond	2	35	18
K	41	40	Circulaire	Peu profond	1	35	41
L	11	12	Circulaire	Peu profond	1	35	43
M	27	26	Hexagonale	Profond	2	100	-
N	39	42	Hexagonale	Profond	Aucun	100	13
O	25	24	Hexagonale	Profond	3	100	18
P	43	44	Hexagonale	Peu profond	3	100	82
Q	45	46	Circulaire	Peu profond	3	100	88
R	14	13	Circulaire	Peu profond	Aucun	100	23
S*	23	22	Hexagonale	Profond	1	100	18
T	20	21	Hexagonale	Peu profond	Aucun	100	21
U	19	18	Hexagonale	Peu profond	1	100	42
V	17	15	Circulaire	Profond	2	100	-
Substrat	1						
Substrat	16						

*Ce SPAD fait référence au SPAD à anneau de garde par diffusion dans ce manuscrit

Annexe B. Prototype 2 – Puce A

Tableau B.1 Liste des signaux correspondant aux plots de la puce A du prototype 2

# de plot	Signal
1	HV4
2	HV6
3	HV2
4	Substrat
5	Substrat
6	Substrat
7	CVDD*
8	CVSS*
9	QVDD*
10	QVSS*
11	Substrat
12	HV5
13	Substrat
14	HV1
15	Substrat
16	HV3

*Ces signaux servent à l'alimentation du circuit 3D Chartered/Tezzaron

Tableau B.2 Liste des caractéristiques structurales des SPAD de chacun des SPAD des matrices la puce A du prototype 2

Matrice	Géométrie	Type d'isolation	Distribution des contacts	Facteur de remplissage (%)
M1	Carrée	Puits n	Asymétrique	11,7
M2 et M5	Carrée	Puits n	Asymétrique	7,9
M3	Octogonale	Puits p	Symétrique	39,5
M4	Octogonale	Puits p	Asymétrique	38,2
M6	Octogonale	Puits p	Asymétrique	53,8

Annexe C. Prototype 2 – Puce B

Tableau C.1 Liste des matrices de SPAD conçus dans la puce B du prototype 2

Matrice	Nombre de SPAD	Anneau de garde	Puits n	Distribution des contacts	Isolation	Autres
M1	6	Diffusion	Profond	Symétrique	Puits n	Gravure des diélectriques
M2	6	Diffusion	Profond	Symétrique et asymétrique	Puits n	$2 \leq EAC \leq 4 \mu m$ $2 \leq ENS \leq 4 \mu m$
M3	6	Diffusion	Profond	Asymétrique	Puits p	Équivalent à Puce-A M6 <u>Non-fonctionnel</u>
M4	6	Diffusion	Profond	Symétrique	Aucun	Mesures de diaphonie
M5	6	Diffusion	Profond	Symétrique	Puits n	$1,5 \leq \text{Diamètre} \leq 11 \mu m$
M6	6	Diffusion	Profond	Asymétrique	Puits n	Équivalent à Puce-A M1, M2 et M5 <u>Non-fonctionnel</u>
M7	6	Diffusion	Profond	Symétrique	Puits n	Mesures de diaphonie
M8	6	Virtuel	Profond et peu profond	Symétrique	Puits n	-
M9	6	Diffusion	Profond	Asymétrique	Puits p	Équivalent à Puce-A M1 et M4 <u>Non-fonctionnel</u>
M10	6	Diffusion	Profond	Asymétrique	Puits p	Mesures de diaphonie
M11	3	Aucun	Profond	Asymétrique	Puits n	<u>Non-fonctionnel</u>
M12	6	Diffusion	Profond	Symétrique	Puits p	Mesures de diaphonie <u>Non-fonctionnel</u>
M13	9					
M14	6					
M15	4	Diffusion	Profond	Asymétrique	Puits n	Caractérisation des circuits d'étouffement

Annexe D. Prototype 2 - Puce D

Tableau D.1 Liste des signaux correspondant aux plots de la puce D du prototype 2

# de plot	Nom	E/S	Signal	Description
1	S4	Sortie	0-3,3 V	Sortie SPAD 4
2	S1	Sortie	0-3,3 V	Sortie SPAD 1
3	S2	Sortie	0-3,3 V	Sortie SPAD 2
4	S3	Sortie	0-3,3 V	Sortie SPAD 3
5	ENABLE	Entrée	0-3,3 V	0 V – M0 est activé 3,3 V – M1 est activé
6	HV1	Entrée	0-30 V	Alimentation de M1
7	Temps mort	Entrée	0-200 μ A	Référence permettant d'ajuster le temps de holdoff
8	3V3	Entrée	3,3 V	Alimentation 3.3V
9	COM	Entrée	0 V	Référence de tension
10	HV0	Entrée	0-30 V	Alimentation de M0
11	S7	Sortie	0-3,3 V	Sortie SPAD 7
12	S8	Sortie	0-3,3 V	Sortie SPAD 8
13	S9	Sortie	0-3,3 V	Sortie SPAD 9
14	S5	Sortie	0-3,3 V	Sortie SPAD 5
15	S6	Sortie	0-3,3 V	Sortie SPAD 6
16	COM	Entrée	0 V	Référence de tension
17	5V	Entrée	5 V	Alimentation 5 V pour le line driver à l'interne
18	Recharge	Entrée	0-200 μ A	Référence permettant d'ajuster le temps de recharge

Annexe E. Prototype 2 - Puce E

Tableau E.1 Liste des signaux correspondant aux plots de la puce E du prototype 2

# de plot	Signal	# de plot	Signal
1	G1-Cathode	20	G3C-Anode
2	G5-Cathode	21	G4A-Anode
3	G1-Substrat	22	G3D-Anode
4	G5-Substrat	23	G4B-Grille
5	G1A-Anode	24	G3E-Anode
6	G5A-Anode	25	G6C-Anode
7	G1B-Anode	26	G4B-Anode
8	G5B-Anode	27	G2D-Anode
9	G1C-Anode	28	G4C-Grille
10	G5C-Anode	29	G2C-Anode
11	G1D-Anode	30	G4C-Anode
12	G5D-Anode	31	G2B-Anode
13	G4-Cathode	32	G6B-Anode
14	G3-Cathode	33	G2A-Anode
15	G3-Substrat	34	G6A-anode
16	G3A-Anode	35	G2-Substrat
17	G4-Substrat	36*	G6-Substrat*
18	G3B-Anode	37	G2-Cathode
19	G4A-Grille	38	G6-Cathode

* Doit être laissé flottant pour être fonctionnel

Tableau E.2 Liste des SPAD conçus dans la puce E du prototype 2

SPAD	Anneau de garde	Puits n	Distribution des contacts	Isolation	Autres
G1A	Diffusion	Profond	Symétrique	Puits n	-
G1B	Diffusion	Profond	Asymétrique	Puits n	-
G1C	Virtuel	Profond	Symétrique	Puits n	-
G1D	Virtuel	Profond	Symétrique	Puits n	-
G2A	Virtuel	Peu profond	Symétrique	Puits n	-
G2B	Virtuel	Peu profond	Symétrique	Puits n	-
G2C	Diffusion	Profond	Symétrique	Puits p	-
G2D	Diffusion	Profond	Symétrique	Puits p	-
G3A	Aucun	Peu profond	Symétrique	Puits n	-
G3B	Aucun	Profond	Symétrique	Puits n	-
G3C	Diffusion	Profond	Symétrique	Puits n	Ratio prérim./aire = 0,27
G3D	Diffusion	Profond	Symétrique	Puits n	Ratio prérim./aire = 0,30
G3E	Diffusion	Profond	Symétrique	Puits n	Ratio prérim./aire = 0,44
G4A	Diffusion	Profond	Symétrique	Puits n	Avec grille de polysilicium autour des SPAD
G4B	Virtuel	Profond	Symétrique	Puits n	
G4C	Aucun	Profond	Symétrique	Puits n	
G5A	Diffusion	Profond	Asymétrique	Puits n	Conçue pour des mesures EBIC
G5B	Virtuel	Profond	Asymétrique	Puits n	
G5C	Virtuel	Peu profond	Asymétrique	Puits n	
G5D	Aucun	Peu profond	Asymétrique	Puits n	
G6A	-	-	-	-	Structure $n+p$ Non-Fonctionnel
G6B	Diffusion	Profond	Symétrique	Puits p	Non-Fonctionnel
G6C	Diffusion	Profond	Symétrique	Puits p	Non-Fonctionnel

Annexe F. Prototype 2 - Puce F

Tableau F.1 Liste des signaux correspondant aux plots de la puce F1 du prototype 2

# de plot	Signal	TSV
1	CV1	C4
2	SUBSTRAT	-
3	D3_KI+	E5
4	D3_KI-	E12
5	D2_KI+	B10
6	D1_KI+	A14
7	D2_LI+	H15
8	D1_LI+	I16
9	D5+	E14
10	D5-	E13
11	D4+	M13
12	D4-	N13
13	PLOT	-
14	SUBSTRAT	-
15	D3_LI-	L9
16	D3_LI+	L8
17	D1_LI-	P8
18	D2_LI-	O7
19	D1_KI-	M1
20	D2_KI-	I2
21	KELVIN4	F3
22	KELVIN3	F3
23	KELVIN2	E3
24	KELVIN1	E4

Tableau F.2 Liste des signaux correspondant aux plots de la puce F2 du prototype 2

# du plot	Description
1	Connexion au plot seulement
2	Connexion à 6 TSV
3	Connexion à 1 TSV
4	Connexion à 2 TSV
5	Connexion à 1 TSV
6	Connexion à 2 TSV